N° d'ordre

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

**Slobodan PETKOVIĆ**
Ingénieur en Génie Civil
de l'Université de Belgrade

SUJET

# Modification des caractéristiques d'une turbulence sous l'influence de particules solides en suspension

Soutenue le 18 Avril 1972 devant la Commission d'Examen

M. J. KRAVTCHENKO — Président

M. A. CRAYA
Mlle G. COMTE-BELLOT
M. M. BOUVARD
— Examinateurs

GRENOBLE

N° d'ordre

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

**Slobodan PETKOVIĆ**
Ingénieur en Génie Civil
de l'Université de Belgrade

SUJET

# Modification des caractéristiques d'une turbulence sous l'influence de particules solides en suspension

Soutenue le 18 Avril 1972 devant la Commission d'Examen

| | |
|---|---|
| M. J. KRAVTCHENKO | Président |
| M. A. CRAYA<br>Mlle G. COMTE-BELLOT<br>M. M. BOUVARD | Examinateurs |

GRENOBLE

UNIV.
LEIDEN
BIB.

## AVANT-PROPOS

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été accomplis aux Laboratoires de Mécanique des Fluides de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, au cours de mon séjour, en qualité de boursier du Gouvernement français, de février 1970 à avril 1972.

Je voudrais tout d'abord remercier l'Institut des Eaux "Jaroslav Černi" de Belgrade qui m'a permis de m'absenter si longtemps. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. BRUK, Professeur de l'Université de Belgrade, qui a pris l'initiative de mon détachement à Grenoble, lors de ses rencontres avec MM. KRAVTCHENKO et BOUVARD.

M. le professeur KRAVTCHENKO a bien voulu m'accueillir dans les Laboratoires, à mon arrivée, en février 1970 et appuyer ma demande de bourse, ce qui a constitué la condition essentielle de mon séjour en France. Il m'a toujours témoigné sa sympathie, qui reflète ses sentiments amicaux pour mon pays. Enfin, il m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de ma thèse. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je voudrais exprimer ma vive reconnaissance à M. le Professeur CRAYA qui a bien voulu m'accepter dans son équipe de recherches "Dynamique des Liquides et des Gaz" et qui a porté un grand intérêt à mon travail. Il m'a prodigué des conseils précieux et m'a fait profiter de sa profonde connaissance de la Mécanique des Fluides.

J'adresse ma gratitude à Mlle COMTE-BELLOT qui a bien voulu faire partie de mon jury de thèse.

Je suis particulièrement reconnaissant à M. BOUVARD, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et Maître de Conférences à l'U.S.M.G., qui a dirigé

ma thèse. Je lui dois le sujet de cette recherche, dont il a été le guide. En outre, il a su me faire profiter de son expérience enrichissante. Les conseils et les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer ont contribué pour une large part au succès de l'étude.

Je remercie tous les chercheurs du Groupe de Dynamique des Liquides et des Gaz pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et la discussion fructueuse au cours du séminaire qui lui a été consacré.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à M. HOPFINGER, Chargé de recherches au C.N.R.S., avec lequel j'ai eu, tout au long de mon travail, des échanges de vues très fructueux.

Sur le plan expérimental, je suis très reconnaissant à MM. PICAUD et RIGOLLETI qui ont apporté beaucoup de soin à la mise au point du dispositif expérimental et dont l'aide pour résoudre plusieurs problèmes techniques au cours de mon étude a été précieuse.

Je tiens également à remercier le personnel du Service Electronique, pour son aide permanente et son attitude amicale à mon égard. Je suis particulièrement reconnaissant à M. BAUDOIN, Chef du Service, pour la réalisation d'un dispositif électronique, essentiel pour les mesures, et à M. LOUIS qui m'apportait, tout au long de mon étude, son aide compétente avec empressement et bonne humeur.

Je remercie sincèrement Mlle MARTINEZ qui a assuré la frappe du mémoire, en apportant un grand soin à sa présentation.

Mes remerciements vont également à M. LAPIERRE qui a dessiné les figures jointes au texte de ce mémoire.

Je remercie enfin M. BRAULT et le personnel du Service Reprographie, qui ont assuré l'impression du mémoire.

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION ..... 1

CHAPITRE I - ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES SUR LA TURBULENCE EN PRESENCE DES PARTICULES SOLIDES EN SUSPENSION ..... 3

1. Concept théorique de la considération du phénomène de suspension des particules solides dans un écoulement turbulent ..... 3

2. Etudes sur le problème de suspension de particules solides dans un écoulement turbulent ..... 5

2.1. Etudes théoriques ..... 5

2.2. Etudes expérimentales ..... 13

2.3. Conclusions ..... 19

3. Différents aspects de l'influence de particules solides en suspension sur la turbulence de l'écoulement porteur ..... 21

3.1. Cas général ..... 21

3.2. Cas caractéristiques de suspension de particules solides dans un écoulement turbulent ..... 23

3.3. Analyse qualitative de la signification des différents aspects de l'influence de particules solides sur la turbulence dans les cas caractéristiques de suspension ..... 24

4. Principaux objectifs de l'étude ..... 25

CHAPITRE II - INSTALLATION EXPERIMENTALE DE BASE ET CARACTERISTIQUES DE LA TURBULENCE CREEE ..... 27

1. Description sommaire de l'installation expérimentale ..... 27

Pages

2. Procédé expérimental de mesure de turbulence ..... 28
2.1. Mesure de vitesses turbulences ..... 28
2.2. Analyse spectrale du signal turbulent ..... 31
3. Caractéristiques de la turbulence, créée dans la cuve ..... 33
4. Considérations théoriques sur la turbulence créée dans la cuve ..... 36
4.1. Diffusion d'énergie turbulente ..... 36
4.2. Spectre d'énergie turbulente ..... 36
4.3. Pression moyenne ..... 38

CHAPITRE III - MESURES PAR LA METHODE DU FIL CHAUD ..... 41
1. Recherche de la méthode expérimentale ..... 41
2. Application d'un protecteur de la sonde à film chaud ..... 43
2.1. Principe et réalisation du protecteur ..... 43
2.2. Essais préliminaires avec le protecteur dans l'eau pure ..... 45
2.3. Application du protecteur en présence de particules solides en suspension - phénomène de bouchage du protecteur par les billes .. 48
3. Mesures de turbulence par la méthode du fil chaud, avec protecteur, en présence de particules solides en suspension ..... 50
3.1. Limitation des mesures au cas de faible concentration de particules solides ..... 50
3.2. Mesures des vitesses turbulentes ..... 51
3.3. Analyse spectrale ..... 57
3.4. Echelles turbulentes ..... 61
3.5. Interprétation des résultats expérimentaux ..... 61
4. Mesures de la variation de la concentration de particules solides à un niveau donné, en fonction de la quantité totale des billes en suspension ..... 67
4.1. Concentration limite de particules solides dans un écoulement turbulent ..... 67
4.2. Procédé expérimental ..... 71
4.3. Interprétation des résultats de mesures ..... 72

CHAPITRE IV - MESURES PAR LA METHODE DU CAPTEUR DE PRESSION ..... 85
1. But d'application du capteur de pression dans le cadre de l'étude expérimentale ..... 85

Pages

2. Mise au point de la méthode ..... 86
2.1. Principe de mesure ..... 86
2.2. Analyse de grandeur mesurée ..... 86
2.3. Système de mesure ..... 87
2.4. Procédé expérimental ..... 89

3. Mesures dans l'eau pure ..... 89
3.1. Phénomène de la propagation des ondes de pression du générateur de la turbulence dans la cuve ..... 89
3.2. Relation entre les mesures au fil chaud et au capteur de pression 91

4. Mesures en présence de particules solides en suspension ..... 94

5. Essai d'interprétation des résultats expérimentaux : Analyse de mécanisme de modification de turbulence sous l'influence de particules en suspension ..... 99

CONCLUSION ..... 105

BIBLIOGRAPHIE ..... 109

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534904_0026

## NOTATIONS PRINCIPALES

| | | |
|---|---|---|
| $C$ | : | concentration de particules solides en suspension |
| $u_1$ | : | vitesse de la phase fluide |
| $v_1$ | : | vitesse de la phase solide |
| $\rho_f$ | : | densité de la phase fluide |
| $\rho_s$ | : | densité de la phase solide |
| $\mu$ | : | viscosité dynamique du fluide |
| $\nu$ | : | viscosité cinématique du fluide |
| $d$ | : | diamètre d'une particule solide |
| $w$ | : | vitesse de chute d'une particule solide en eau calme |
| $\tau$ | : | constante de temps d'une particule solide |
| $u'$ | : | vitesse turbulente |
| $L$ | : | échelle intégrale turbulente |
| $\lambda$ | : | microéchelle turbulente |
| $\eta$ | : | échelle de Kolmogoroff |
| $t_L$ | : | échelle intégrale temporelle |
| $t_\lambda$ | : | temps caractéristique correspondant à la microéchelle |
| $t_d$ | : | temps caractéristique de la dissipation (correspondant à $\eta$) |
| $\epsilon$ | : | coefficient de diffusion d'énergie |
| $K$ | : | nombre d'onde |
| $n$ | : | fréquence temporelle |

$F_{GEN}$ : fréquence du mouvement de la plaque dans la cuve à turbulence

$C_{TOT}$ : concentration moyenne de particules solides en suspension dans la cuve à turbulence : le rapport entre le poids total des billes en suspension et le poids de l'eau dans la cuve

N : mesure de la quantité de billes en suspension dans la cuve : nombre des unités volumétriques de billes

p : pression

$\overline{h'^2}$ : valeur quadratique moyenne de grandeur mesurée par le capteur de pression

# INTRODUCTION

Le problème de la suspension des particules solides dans un liquide turbulent est situé dans le domaine général des écoulements polyphasiques. L'importance de ce domaine est bien connue, car il comprend divers phénomènes naturels (le transport des matériaux solides dans les rivières ...) et procédés techniques (hydrotransport dans les conduites ...). SOO, dans l'introduction de [26] met bien en évidence combien les écoulements polyphasiques intéressent des branches variées de la science et de la technique.

C'est la raison pour laquelle le problème a fait l'objet de nombreuses recherches, mais en dépit du grand intérêt et des efforts des chercheurs, l'écoulement polyphasique est loin d'être éclairci au point de vue théorique à cause de sa complexité. Il faut remarquer qu'il s'agit, dans la plupart des cas, d'écoulements polyphasiques turbulents, car il est bien connu que la turbulence est un aspect habituel des écoulements des fluides, tandis que le régime laminaire en est l'exception. Par conséquent, dans le problème des écoulements polyphasiques, à la complexité de la turbulence s'ajoute la complexité de l'interaction dynamique *) de plusieurs phases existant dans l'écoulement.

A ce propos, on peut citer VASILEV [32] , qui, à la fin de son rapport général "les problèmes de la théorie de l'écoulement à deux phases " (XIIIe Congrès AIRH, Japon, 1969) a donné la conclusion suivante :

---

*) Remarquons que la notion de l'interaction entre les différentes phases, comprend, en général, tous les phénomènes physico-chimiques qui apparaissent dans un milieu polyphasique - effets thermodynamiques, chimiques, électriques, etc. - Cependant, afin de simplifier le problème, on suppose que ces phénomènes ont une influence négligeable sur l'écoulement. Ainsi, on réduit la considération théorique d'un écoulement polyphasique à un problème de mécanique classique.

"D'après l'état actuel des connaissances du problème des écoulements polyphasiques, je pense qu'on ne peut pas prétendre que la solution de ce problème est très proche. Il est évident que l'écoulement polyphasique représente un domaine de l'hydrodynamique parmi les plus difficiles. Cet écoulement est la combinaison des complexités de différents domaines de mécanique des fluides, y compris le problème aussi formidable de la turbulence. Le nombre des questions actuellement éclaircies est faible par rapport à celui des questions qui attendent toujours les réponses satisfaisantes".

Le problème de la suspension de particules solides dans un écoulement turbulent comprend deux aspects fondamentaux. Le premier aspect - la répartition des particules solides sous l'action de la turbulence - est plus exploré et mieux connu que le deuxième - la modification de la turbulence en présence de matériaux solides en suspension. Ce deuxième aspect fait l'objet de notre étude.

La modification des caractéristiques de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension représente un sujet toujours mal connu, même en ce qui concerne les problèmes de fond. Les concepts théoriques du phénomène et les hypothèses sur le caractère de la modification de l'intensité et de la structure de la turbulence en présence de corps solides en suspension, suivant les différents auteurs, sont tout à fait différents et même contradictoires.

Nous avons essayé de résumer la connaissance actuelle de ce phénomène et définir les paramètres essentiels qui l'influencent.

Notre étude expérimentale représente la suite de l'étude de M. BOUVARD "Turbulence sans vitesse moyenne et diffusion de particules solides dans l'eau" et nous avons utilisé la même installation expérimentale - "Cuve à turbulence" - La différence principale entre l'étude de BOUVARD et la nôtre est au point de vue de la concentration de particules solides en suspension. Dans notre cas, celle-ci est beaucoup plus grande, puisqu'elle constitue le sujet même de notre étude. Dans le cadre de nos expériences, nous avons effectué les mesures de turbulence, en présence de billes en suspension, par deux méthodes différentes - fil chaud et capteur de pression - et les mesures de concentration des particules solides.

Enfin, nous avons essayé de donner une interprétation des résultats expérimentaux dans le contexte de la connaissance actuelle du phénomène de modification de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension.

-=-=-=-=-=-=-

# CHAPITRE I

## ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES SUR LA TURBULENCE EN PRESENCE DES PARTICULES SOLIDES EN SUSPENSION

### I - CONCEPT THEORIQUE DE LA CONSIDERATION DU PHENOMENE DE SUSPENSION DES PARTICULES SOLIDES DANS UN ECOULEMENT TURBULENT.

Un des concepts de base dans les considérations théoriques sur la suspension des particules solides dans un écoulement consiste à assimiler la suspension à un milieu continu. Suivant HINZE [18], on admet que la suspension est suffisamment dense et les particules solides suffisamment petites, pour qu'un élément du fluide contienne un grand nombre de particules, tout en restant suffisamment petit pour qu'on puisse décrire toutes les grandeurs, liées à ce volume, comme les fonctions linéaires de coordonnées.

Une des quantités essentielles qui déterminent une suspension est la concentration de particules solides. On peut la définir comme le rapport entre la part du volume élémentaire de suspension occupée par les particules solides et ce volume entier. Suivant la définition du concept théorique, on considère la concentration comme une fonction continue des coordonnées et de temps, soit $C = C(X_1, X_2, X_3, t)$.

Conformément au modèle théorique de la suspension, on définit la vitesse du fluide (U) à un point donné comme la vitesse moyenne de la phase fluide dans l'élément de volume de suspension, représenté par ce point. La vitesse de la phase solide (V) est définie comme la vitesse moyenne de toutes les particules solides, situées

dans l'élément du volume de suspension, assimilé au point donné. Les composantes des vitesses des deux phases sont les fonctions continues de l'espace et du temps

$$U_i = U_i (X_1\ X_2\ X_3,\ t) \qquad V_i = V_i (X_1\ X_2\ X_3,\ t)$$

D'après la définition de la concentration, la masse de l'unité de volume de la suspension est égale à

$$\rho = (1 - C)\,\rho_f + C\rho_s \tag{I.1}$$

Comme il s'agit de la suspension des particules solides dans un liquide, on peut admettre que les densités de toutes les phases - $\rho_f$ (densité du liquide) et $\rho_s$ (densité de particules solides) sont constantes.

L'équation de continuité pour la phase fluide est donnée par

$$\frac{\partial}{\partial t}(1-C) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(1-C)\,u_i\right] = 0 \tag{I.2}$$

et pour la phase solide

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(C\,V_i) = 0 \tag{I.3}$$

La méthode habituelle de l'analyse théorique d'un écoulement à deux phases consiste à considérer chacune d'elle séparément, en introduisant dans l'équation pour une phase un terme qui exprime l'influence de l'autre. Ce terme d'interaction est le même dans les équations dynamiques relatives à chaque phase, avec le signe différent, suivant le principe d'action et de réaction. Ainsi, les équations dynamiques pour la phase fluide sont, en fait, les équations de Navier-Stokes, avec un terme supplémentaire, qui exprime l'interaction entre les deux phases. D'une manière analogue, l'équation du bilan d'énergie d'un écoulement à deux phases, outre les termes de la variation d'énergie cinétique et potentielle, de travail de déformation de fluide et de la dissipation visqueuse, contient aussi le terme d'échange d'énergie entre deux phases.

C'est-à-dire, les équations générales contiennent, d'une part, les termes "classiques" de la turbulence d'un écoulement monophasique et, d'autre part, les termes, qui expriment l'effet de présence des particules solides. A cause de la complexité évidente des équations générales du problème d'un écoulement turbulent avec les particules solides en suspension, il est clair que la voie théoriquement rigoureuse de l'analyse ne permet pas d'espérer, pour le moment, un progrès réel dans la connaissance de ce problème. Il reste indispensable d'introduire les hypothèses approchées dans l'analyse théorique du problème.

Historiquement, les premiers essais d'analyse théorique du problème de suspension des particules solides dans un écoulement turbulent ont été basés sur la théorie de diffusion turbulente, en considérant les corps solides en suspension comme une matière passive, transportée par l'écoulement sans qu'elle exerce une réaction sur la turbulence de l'écoulement porteur.

A une époque plus récente, plusieurs essais d'une analyse plus exacte et plus profonde du phénomène sont apparus. L'examen de quelques études de ce genre fait l'objet du paragraphe suivant.

## 2 - ETUDES SUR LE PROBLEME DE LA SUSPENSION DES PARTICULES SOLIDES DANS UN ECOULEMENT TURBULENT.

### 2.1 - Etudes théoriques.

a) Etude de BARENBLATT.

Dans l'étude d'un écoulement turbulent en présence des particules solides en suspension [3] BARENBLATT a adopté une méthode d'analyse théorique, différente de celle mentionnée au paragraphe précédent. En effet, au lieu de considérer chaque phase séparément, il considère l'ensemble de toutes les deux phases, en assimilant le mélange fluide-particules solides à un fluide non-homogène. L'avantage de cette méthode réside dans la suppression formelle de l'interaction entre les deux phases de l'écoulement. BARENBLATT introduit d'abord la densité du liquide non-homogène dans un point, dont la définition correspond à (I.1) et la vitesse du déplacement du centre de gravité du volume infiniment petit du liquide non-homogène entourant le point donné

$$V_i = \frac{\rho_f (1 - C) u_i + \rho_s C v_i}{\rho} \qquad (I.4)$$

(la notation est la même que dans le paragraphe précédent).

L'auteur établit le système des équations du mouvement du liquide non-homogène, qui comprend l'équation dynamique, ayant la forme de l'équation de Navier-Stokes, avec la vitesse et la densité définies par (I.4) et (I.1) et l'équation du bilan de la masse.

Pour fermer le système des équations, BARENBLATT introduit certaines hypothèses physiques concernant le caractère de l'écoulement et de la suspension :

1 - Il considère la suspension avec faible concentration de particules solides.
2 - Les particules solides sont petites par rapport à la microéchelle turbulente.
3 - L'accélération de l'écoulement est faible par rapport à l'accélération de gravitation g .

4 - Les composantes horizontales de la vitesse des particules et du liquide coïncident, tandis que les composantes verticales diffèrent d'une certaine quantité, supposée égale à la vitesse de chute des particules en eau calme (W).

Remarquons que cette dernière hypothèse est discutable. Il s'agit, en effet, d'une question de fond du problème étudié : comment les particules solides suivent le mouvement du fluide, ce qui implique la question du glissement entre la particule et le fluide et, par conséquent, de l'existence du mouvement relatif des particules solides par rapport au fluide. A notre avis, BARENBLATT n'attache pas à cette question l'importance qu'elle mérite dans le cadre théorique du problème de l'écoulement turbulent en présence de particules solides en suspension.

L'auteur considère aussi le bilan d'énergie du mouvement turbulent du liquide non-homogène. C'est l'aspect particulièrement intéressant de son étude : BARENBLATT est l'un des premiers chercheurs qui prennent théoriquement en considération la réaction de la suspension de particules solides sur la turbulence de l'écoulement porteur.

En effet, BARENBLATT admet que l'écoulement doit fournir une certaine énergie pour maintenir les particules solides pesantes en suspension et que ce travail de la mise en suspension des particules solides est effectué au dépens de l'énergie turbulente de l'écoulement. En multipliant l'équation dynamique par la vitesse, suivant le procédé classique, et en appliquant les opérations de moyennes, l'auteur aboutit pour "l'énergie de pulsation de l'écoulement, nécessaire pour mettre les particules en suspension", à l'expression $\left[-g\,\overline{\rho' V_3'}\right]$ (l'axe - $X_3$ coïncide avec la direction de l'accélération de gravitation g ). Ce terme peut être approché, suivant l'auteur, par

$$\left[\overline{C' V_3'}\; g\, \delta\, \rho_f\right] \qquad (I.5)$$

où

$$\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \qquad (I.6)$$

L'effet de particules solides sur la turbulence de l'écoulement porteur dépend donc, suivant BARENBLATT, de la corrélation entre les fluctuations de la concentration et de la vitesse et du rapport entre les densités du fluide et des particules. L'auteur souligne que le terme (I.5) peut être considérable même pour une faible concentration de particules solides en suspension, grâce au facteur important g.

Le terme exprimant l'effet de particules solides en suspension sur la turbulence de l'écoulement porteur mis à part, la structure du bilan d'énergie turbulente du liquide non-homogène, établi par BARENBLATT est la même que pour le fluide

pur.

Après avoir établi le système général des équations de mouvement turbulent du liquide non-homogène, BARENBLATT considère le cas de l'écoulement plan, en moyenne stationnaire et homogène suivant l'horizontale.

On a, en effet :

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial X_1} = -\beta \rho_f \qquad \frac{\partial p}{\partial X_2} = \frac{\partial p}{\partial X_3} = 0 \tag{I.7}$$

Dans ce cas, à partir de l'équation du bilan de la masse on trouve la relation :

$$\overline{C' V_3'} = W \bar{C} \tag{I.8}$$

Ainsi, le travail de la mise en suspension des particules solides par l'écoulement est donné par l'expression :

$$g \overline{\rho' V_3'} = g \sigma \rho_f \overline{C' V_3'} = g \sigma \rho_f W \bar{C} \tag{I.9}$$

Avec quelques approximations et admettant les hypothèses habituelles, (mises en évidence en particulier par ROUSE) :

$$\overline{V_i'^2 V_j'} = -\epsilon_E^{(1)} \frac{\partial E}{\partial X_j} \tag{I.10}$$

$$\overline{V_i' V_j'} = \frac{2}{3} E \delta_{ij} - \epsilon_E^{(2)} \left( \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial X_i} \right) \tag{I.11}$$

$$\overline{C' V_j'} = -\epsilon_s \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_j} \tag{I.12}$$

où $$E = \frac{1}{2} \rho_f \sum_{i=1}^{3} \overline{V_i'^2}$$

BARENBLATT, à partir du système général des équations dynamiques, de bilan de la masse et de bilan d'énergie de pulsation, aboutit aux équations suivantes :

$$\epsilon_E^{(2)} \frac{d\bar{V}_1}{dX_3} = V_*^2 - \beta X_3 \tag{I.13}$$

$$W \bar{C} + \epsilon_s \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_3} = 0 \tag{I.14}$$

$$g \sigma \rho_f W \bar{C} + Q - \rho_f \frac{d}{dX_3} \left( \epsilon_E^{(1)} \frac{dE}{dX_3} \right) - \rho_f \epsilon_E^{(2)} \left( \frac{d\bar{V}_1}{dX_3} \right)^2 = 0 \tag{I.15}$$

($V_*$ désigne "la vitesse de frottement")

Dans l'équation du bilan d'énergie turbulente (I.15) le deuxième terme ( Q ) représente la dissipation visqueuse, le troisième la diffusion turbulente et le quatrième le gain de l'énergie de pulsation aux dépens de l'énergie de l'écoulement moyen.

Maintenant on peut éclaircir la conception de BARENBLATT. Si le premier terme de l'équation (I.15) est faible par rapport aux autres et peut être négligé, le système se décompose en un système des équations du mouvement du liquide pur (I.13) et (I.15) et l'équation du bilan de la masse (I.14) qui sont indépendantes entre elles. En fait, en négligeant l'effet de particules solides en suspension sur l'écoulement porteur, on revient à la conception théorique dite "de diffusion", qui consiste à considérer les particules en suspension comme une matière passive, transportée par le liquide, sans tenir compte de sa réaction dynamique sur l'écoulement.

D'ailleurs, on voit que l'équation (I.14) est, en fait, l'équation de SCHMIDT-ROUSE, c'est à dire l'exemple classique de "la conception de diffusion".

Nous pouvons résumer la conception théorique de BARENBLATT de la façon suivante :

L'effet de particules solides en suspension sur la turbulence de l'écoulement porteur dépend du rapport entre "l'énergie de la mise en suspension" et les autres termes du bilan d'énergie turbulente (la production d'énergie turbulente, la dissipation visqueuse). Si l'énergie, fournie par l'écoulement pour maintenir une certaine quantité donnée de particules solides en suspension, est faible par rapport à la dissipation visqueuse, la structure du bilan d'énergie turbulente n'est pratiquement pas modifiée par rapport au fluide pur. Cela signifie que la turbulence n'est pas significativement affectée par la présence de particules solides en suspension. Dans le cas contraire, la structure du bilan d'énergie turbulente est modifiée par rapport au fluide pur, à cause de l'introduction du terme supplémentaire, correspondant à "l'énergie de la mise en suspension", qui est du même ordre de grandeur que les autres membres du bilan énergétique.

Dans le cadre de cette conception, BARENBLATT continue son calcul, en introduisant quelques hypothèses en vue de résoudre le système des équations (I.13), (I.14) et (I.15). Il aboutit finalement à la définition du critère de la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension, exprimé par le nombre adimensionnel :

$$K = - g \, \delta \, q_2 \frac{\frac{\overline{dc}}{dx_3}}{\left(\frac{\overline{dv_1}}{dx_3}\right)^2} \qquad (I.16)$$

( $q_2$ est une "constante universelle")

qui représente, en fait, le rapport entre l'énergie fournie par l'écoulement pour mettre les particules solides en suspension et la production d'énergie turbulente. BARENBLATT souligne que la structure de $K$ est analogue à celle du nombre de RICHARDSON. Suivant l'auteur, pour $K \ll 1$ "le mouvement peut être décrit par la théorie dite de diffusion qui est basée sur l'hypothèse que les particules en suspension n'influent pas sur la dynamique de l'écoulement porteur". Par contre, si la valeur de $K$ est voisine de $1$, cela signifie que l'effet de particules solides sur la turbulence est important et que la turbulence est modifiée sous leur influence.

L'objection essentielle qu'on peut présenter à l'étude de BARENBLATT concerne son hypothèse selon laquelle le seul effet de particules solides en suspension sur la turbulence de l'écoulement porteur est "l'effet gravitationnel" - c'est-à-dire l'écoulement doit fournir un certain travail pour maintenir en suspension les particules solides plus lourdes que le liquide même - En effet, nous verrons dans la suite plusieurs aspects de l'influence des particules en suspension sur la turbulence.

Plusieurs simplifications et hypothèses approchées, utilisées dans le calcul de BARENBLATT afin de le mener jusqu'à des résultats plus concrets mettent en question, dans une certaine mesure, l'application directe de ces résultats. Néanmoins, la valeur qualitative de ses résultats est incontestable, ce qui est confirmé par plusieurs études expérimentales du phénomène.

Nous verrons dans le chapitre IV quelques aspects de l'application de la théorie de BARENBLATT dans le cadre des résultats de notre étude expérimentale.

b) L'étude de HINO.

Le concept d'analyse théorique du problème de modification de la turbulence en présence des particules solides en suspension, proposé par HINO [16] est tout à fait différent de celui de BARENBLATT. L'idée de base de HINO est que le mécanisme d'influence de particules solides sur la turbulence ne comprend pas seulement l'effet de la mise en suspension, qui exige, pour les particules solides plus lourdes que fluide, une certaine énergie de l'écoulement porteur, mais ce mécanisme est plus complexe. L'inspiration directe de cette étude est constituée par le travail de ELATA et IPPEN sur la modification de la turbulence dans le cas de particules neutres en suspension. ELATA et IPPEN ont trouvé expérimentalement que l'intensité turbulente augmente en fonction de la concentration des particules solides, de densité proche à celle de l'eau ( $\rho_s = 1,05$). Or, raisonne HINO, la suspension de particules neutres

ne doit pas changer la turbulence, suivant les théories dites "gravitationnelles", puisque ces particules n'exigent pas un travail de l'écoulement pour leur mise en suspension.

L'auteur considère un écoulement plan à surface libre, avec la suspension de particules solides. Il part de l'équation d'énergie de l'écoulement établi par VON KARMAN, pour le fluide monophasique. HINO, ensuite, analyse cette équation dans le cas de présence de particules solides en suspension. Il admet deux causes principales de la modification de structure énergétique de l'écoulement par rapport à l'eau pure :

a) Une part de volume du fluide est occupée par les particules solides, et, par conséquent, l'espace effectif du liquide pour le mouvement des tourbillons est moindre et la dissipation visqueuse est réduite.

b) Les particules solides causent une dissipation supplémentaire dans l'écoulement, due aux forces de résistance du fluide au mouvement relatif des particules.

En évaluant les termes de son équation d'énergie, HINO conclut que le deuxième effet est négligeable par rapport au premier.

Pour déterminer l'influence du gradient de la densité dans l'écoulement, dû à la distribution de la concentration des particules solides, HINO établit une équation semi-empirique dite de "bilan de l'accélération turbulente". A partir des équations de l'énergie et du bilan de l'accélération turbulente, en introduisant plusieurs hypothèses simplificatrices, l'auteur aboutit à une relation entre la vitesse turbulente en présence de particules solides en suspension et celle dans l'eau pure. En effet, ce rapport est fonction de la concentration des particules solides, du rapport entre la densité moyenne dans une section de l'écoulement avec suspension et celle du liquide pur, de la constante de VON KARMAN et d'un paramètre déterminant le caractère de la turbulence. La forme analytique de cette fonction est telle que, d'après HINO lui-même, "dans le cas de particules solides de densité très proche de celle du liquide, la turbulence de l'écoulement porteur augmente avec la concentration, tandis que, pour les particules de densité différente de celle du liquide, la turbulence diminue, mais cette décroissance est très faible".

Nous verrons que les résultats de notre étude expérimentale sont en contradiction avec la théorie de HINO.

c) Analyse de FORTIER

FORTIER [14] considère le cas de la faible concentration de particules solides, admettant que leur réaction sur la turbulence est négligeable et il porte son attention sur le comportement des particules dans un liquide turbulent. Bien qu'il ne s'intéresse pas à la modification de turbulence sous l'influence de particules solides en suspension, son analyse est intéressante au point de vue de l'introduction à notre problème.

Dans son analyse du comportement de particules solides dans un écoulement turbulent, FORTIER, suivant le schéma classique, considère 3 paramètres essentiels qui déterminent ce phénomène :

- le rapport entre la densité de particules et celle du liquide : $\frac{\rho_s}{\rho_f}$ ;

- le rapport entre le diamètre des particules et l'échelle turbulente (la microéchelle et l'échelle intégrale : $\frac{d}{\lambda}$ et $\frac{d}{L}$ ) ;

- le rapport entre la constante de temps de particules et le temps caractéristique de la turbulence (analoguement aux rapports précédents, $\frac{\tau}{t_\lambda}$ et $\frac{\tau}{t_L}$ ) *

---

* La notion de "la constante de temps" ( $\tau$ ) d'une particule solide dans un écoulement turbulent est liée à la réponse de la particule aux fluctuations turbulentes : les particules ne répondant qu'aux fluctuations dont le temps caractéristique ( $t_f$ ) est $t_f \geq \tau$. En effet, cette notion a été introduite une première fois dans la considération théorique du mouvement d'une particule solide dans un écoulement uniforme, avec l'hypothèse de la validité de régime de Stokes. Dans ce cadre, $\tau$ détermine l'ordre de grandeur de temps après lequel la particule solide, initialement au repos, atteindra la vitesse du fuide. Dans le régime de Stokes, la constante de temps est définie par :

$$\tau = \frac{\rho_s d^2}{18 \mu}$$

( $\mu$ désigne le coefficient de la viscosité dynamique)

En particulier, dans le cas du mouvement d'une particule sous l'effet de la pesanteur dans un fluide au repos, la particule atteindra sa vitesse de chute finale ($W_s$) dans le régime de Stokes ("la vitesse de Stokes") après le temps de l'ordre de grandeur de $\tau$ . D'où résulte une deuxième définition de $\tau$ :

$$\tau = \frac{W_s}{g}$$

Suivant le critère basé sur ces rapports, FORTIER donne analyse qualitative de plusieurs cas différents, parmi lesquels nous verrons deux cas les plus intéressants.

a) Les particules sont plus petites que les plus petits tourbillons ( $\frac{d}{\lambda} \ll 1$ et $\frac{\tau}{t_\lambda} \ll 1$ ).

Dans ces conditions, un petit élément de volume du fluide qui entoure une particule solide peut être assimilé à une particule fluide. On peut maintenant, d'après FORTIER, distinguer deux cas : l'écoulement dans le champ uniforme d'accélération d'entraînement $a_e$ et l'écoulement sans l'existence de ce champ. Dans ce dernier cas, toutes les trois composantes de vitesses moyennes du fluide et des particules coïncident, tandis que, si le champ d'accélération existe, les vitesses moyennes diffèrent. Dans le cas particulier de champ de la gravitation, cette différence n'existe que pour les composantes verticales et, admettant le régime de Stokes, elle est égale à :

$$\overline{u_3} - \overline{v_3} = - w_s = - g\tau \qquad (I.17)$$

Pour le cas général du champ uniforme d'accélération d'entraînement $a_e$, FORTIER écrit :

$$\overline{u_i} - \overline{v_i} = - a_e \tau \qquad (I.18)$$

Si le champ d'accélération n'existe pas, les vitesses moyennes du fluide et de particules coïncident - la vitesse d'une particule solide oscille d'une façon aléatoire autour de la vitesse moyenne et la vitesse du fluide, qui entoure cette particule, oscille d'une autre façon aléatoire autour de la même valeur moyenne. Supposons à un instant donné la vitesse d'une particule égale à celle du liquide. Sous l'influence d'accélération instantanée du fluide $a'$ en admettant que $a'$ est constante pendant le temps $t_\lambda$ et compte tenu de la condition $\frac{\tau}{t_\lambda} \ll 1$, la vitesse de particule solide atteindra sa valeur terminale, dans le régime de Stokes, au bout d'un temps de l'ordre de $\tau$ :

$$v'_\tau = a' \tau \qquad (I.19)$$

Comme la vitesse du liquide reste, par définition, pratiquement constante dans l'interval de $t_\lambda$, la différence entre les vitesses du fluide et des particules, lesquelles coïncident à l'instant initial, atteindra aussi sa valeur limite après un temps de l'ordre de $\tau$. D'après FORTIER, si l'on considère toutes les particules qui se trouvent dans un instant donné dans un volume donné du fluide, elles auront au

bout d'un temps $\tau$ des vitesses relatives par rapport au fluide qui les entoure égales à $(a'.\tau)$. Pour la turbulence isotrope, on aura finalement

$$\sqrt{\overline{(u'-v')^2}} = \tau\sqrt{\overline{a'^2}} \qquad (I.20)$$

Puisque

$$\sqrt{\overline{a'^2}} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{t_\lambda} \qquad (I.21)$$

on obtient

$$\sqrt{\overline{(u'-v')^2}} = \frac{\tau}{t_\lambda}\sqrt{\overline{u'^2}} \qquad (I.22)$$

Compte tenu de la condition $\frac{\tau}{t_\lambda} \ll 1$ , on a

$$\sqrt{\overline{(u'-v')^2}} \sim 0 \qquad (I.23)$$

et

$$u' \sim v' \qquad (I.24)$$

FORTIER conclut donc que, si $\frac{d}{\lambda} \ll 1$ et $\frac{\tau}{t_\lambda} \ll 1$, les particules solides suivent le fluide et la suspension peut être assimilée à un fluide homogène.

b) Les particules sont de dimensions égales ou supérieures à celles des plus petits tourbillons ( $\frac{d}{\lambda}$ et $\frac{\tau}{t_\lambda}$ de l'ordre de 1).

Comme ce cas est plus compliqué que le cas précédent, FORTIER se contente d'exprimer l'inégalité des vitesses turbulentes du fluide et des particules solides par la relation :

$$\sqrt{\overline{(u'-v')^2}} = \frac{\tau}{t_\lambda}\sqrt{\overline{u'^2}} \cdot B\left(\frac{d}{\lambda}, \frac{d\sqrt{\overline{u'^2}}}{\nu}\right) \qquad (I.25)$$

B dépend de la structure de l'écoulement turbulent et de caractéristiques de particules solides et doit être de l'ordre de grandeur de 1 .

On peut dire que les conclusions de FORTIER sur le rapport entre vitesses turbulentes du liquide et de particules semblent logiques, bien que l'hypothèse de la validité du régime de Stokes pour le mouvement relatif de particules solides, introduite en vue d'analyse théorique du phénomène, soit contestable.

## 2.2. - Etudes expérimentales.

Le phénomène d'un écoulement turbulent en présence des particules solides

en suspension a fait l'objet de plusieurs études expérimentales. A l'époque récente notamment, ce problème a commencé à attirer l'attention de chercheurs. Cet intérêt est lié au développement de l'application des méthodes de transport hydraulique des matériaux solides dans les conduites. Cependant, la plupart de ces études ne donne pas la réponse directe à la question qui nous intéresse : quelle est la modification de la turbulence, due à la suspension des particules solides ? KENNEDY [20], SNYDER et LUMLEY [24] et SILIN, VITOSHIN, KARASIK, OCHERETKO [23] étudient les caractéristiques du mouvement de particules solides dans un fluide turbulent (le coefficient de diffusion, l'autocorrélation de vitesse). VANONI et NOMICOS [31] et FIELD [13] sont plus proches de notre sujet, mais ils ne mesurent pas directement les caractéristiques de la turbulence - les conclusions sur la modification de la turbulence en présence de particules solides en suspension qu'ils tirent, sont basées sur les mesures de quelques caractéristiques globales de l'écoulement. Enfin, PECHENKIN et VEDENEEV [22] mesurent la turbulence avec particules solides dans une conduite.

Nous passons brièvement en revue ces études.

KENNEDY [20] a mesuré la dispersion des particules solides dans l'écoulement turbulent derrière une grille. Les corps en suspension utilisés sont les sphères de diamètre entre 0,1 et 0,9 mm. KENNEDY détermine par photographie la dispersion des particules injectées dans l'écoulement et en déduit le coefficient de diffusion.

L'étude de SNYDER et LUMLEY est très semblable à celle de KENNEDY. Seulement KENNEDY a étudié la dispersion et le coefficient de diffusion des particules solides, tandis que SNYDER et LUMLEY mesurent l'autocorrélation de vitesse des particules. L'étude expérimentale a été effectuée, comme celle de KENNEDY, par la méthode photographique, dans une soufflerie verticale, avec les différentes sortes de particules solides très fines (de diamètre entre 46,5 et 87 microns).

Les auteurs donnent les conclusions suivantes sur leur étude :

a) La probabilité de la position et de la vitesse d'une particule solide peut être exprimée par la loi de GAUSS.

b) L'autocorrélation diminue plus vite pour les particulles solides plus lourdes.

c) Les particules solides sont soumises à l'effet d'inertie et "crossing-

trajectories effect". *)

d) Les courbes d'autocorrélation et les courbes de corrélation spatiale eulérienne ont des allures semblables.

e) Les résultats expérimentaux confirment l'hypothèse de CORRSIN pour la relation entre l'échelle temporelle intégrale de LAGRANGE ($T_L$) et l'échelle intégrale d'EULER (L), donnée par l'expression :

$$T_L = \frac{L}{u'}$$

ou $u' = \sqrt{\overline{u^2}}$ représente la vitesse turbulente.

L'objectif principal de la recherche de SILIN, VITOSHIN, KARASIK et OCHERETKO [23] est l'étude des caractéristiques turbulentes de toutes les deux phases de l'écoulement chargé de particules solides en suspension dans une conduite. La méthode expérimentale est une méthode spéciale optique-photographique, conçue et développée par les chercheurs soviétiques. (Presque tout les auteurs soviétiques, pour les recherches dans ce domaine, appliquent cette méthode). La méthode est basée sur le principe de l'uniformité optique qui exige l'utilisation des matériaux transparents de même indice de réfraction pour la simulation des particules solides et du fluide.

Les auteurs ont effectué les mesures des fluctuations de composantes longitudinales et verticales de vitesses du fluide et des particules solides, les mesures de corrélation entre les composantes de la vitesse turbulente et corrélations entre les fluctuations de la vitesse et de la concentration des particules solides. D'après les résultats de mesures, présentés en forme de courbes en fonction de la distance de la paroi, les auteurs donnent les conclusions suivantes :

a) La vitesse moyenne longitudinale du fluide $\overline{u}_w$ est plus grande que celle de la phase solide $\overline{u}_s$ . La différence maximum entre ces deux valeurs est à peu près égale à la vitesse de chute de particules solides

b) Les valeurs quadratiques moyennes de fluctuations de vitesses longitudinales et verticales sont un peu plus faibles pour la phase solide que pour la phase

---

*) "Crossing-trajectories effect" désigne le phénomène de différence des trajectoires d'une particule solide et une particule fluide : la particule solide, si sa vitesse de chute est considérable, tombe d'un tourbillon à l'autre, tandis que la particule fluide reste dans un tourbillon pendant toute sa durée de vie.

liquide, de telle façon qu'on peut exprimer leur rapport par les relations suivantes :

$$\frac{\sqrt{\overline{u'^2_w}}}{\sqrt{\overline{u'^2_s}}} \approx \frac{\sqrt{\overline{v'^2_w}}}{\sqrt{\overline{v'^2_s}}} = K \qquad (K > 1)$$

tandis que

$$\frac{(\overline{u'v'})_w}{(u'v')_s} \approx K^2$$

La valeur de $k$ est pratiquement constante dans toute la section et égale à peu près à 1,10.

c) En ce qui concerne les corrélations entre les fluctuations de vitesse et celles de concentration, la conclusion est intéressante, parce que les auteurs trouvent que

$$\overline{c' u'_s} = - \overline{c' u'_w} \qquad \overline{c' v'_s} = - \overline{c' v'_w}$$

L'étude expérimentale de VANONI [30] est déjà classique. Ses expériences ont porté sur des matériaux sableux en suspension dans un canal uniforme. VANONI étudie la distribution de la concentration des particules solides suivant la profondeur du canal, afin de vérifier la loi de SCHMIDT-ROUSE et il trouve que cette loi correspond qualitativement à la réalité, mais non quantitativement. En ce qui concerne l'hypothèse d'égalité de coefficient de diffusion relatives à la quantité du mouvement $\epsilon_E$ et aux matériaux solides $\epsilon_s$, il conclut que pour les matériaux fins $\epsilon_s > \epsilon_E$, tandis que pour les gros matériaux $\epsilon_s < \epsilon_E$, "en raison du glissement entre le liquide et le sable lorsque l'écoulement est accéléré".

VANONI et NOMICOS [31] étudient le changement du coefficient de rugosité du canal en présence des matériaux en suspension. Ils trouvent que la réduction de ce coefficient dans ce cas peut être considérable (jusqu'à 28 %) même pour une concentration des particules solides assez faible (8 %). Les auteurs concluent que cette réduction est due à la décroissance de l'intensité de la turbulence de l'écoulement en présence des particules solides en suspension. FIELD [13], dans l'investigation du problème d'application pratique du jet de l'air avec la poussière du charbon dans les fourneaux industriels, a fait une étude sur l'entraînement de l'air d'ambiance dans un jet de l'air contenant les particules solides. Il a mesuré l'entraînement de l'air dans les jets sans et avec les particules solides et a constaté que l'entraînement diminue considérablement en présence des particules solides. Comme la cause physique de l'entraînement sont les tourbillons dans le jet, FIELD déduit de ses résultats expérimentaux que la turbulence diminue en présence de particules dispersées dans le jet. L'auteur croit que le facteur principal dans le mécanisme de la réduction de turbulence est représenté par rapport entre la constante de temps (relaxation time)

de particule solide et l'échelle temporelle de la turbulence du jet. Il suppose que les particules solides influencent ces tourbillons qui ont l'échelle temporelle de même ordre de grandeur que la constante de temps de particules.

L'étude de PECHENKIN et VEDENEEV [22] est particulièrement intéressante au point de vue de notre travail, parce qu'elle représente une des rares tentatives de détermination expérimentale de la modification de turbulence en présence de particules solides en suspension. D'après les auteurs, un des objectifs de leur recherche était "l'étude du changement de caractéristiques cinématiques de l'écoulement, dûs à la présence des matériaux en suspension et de l'effet de cette modification sur la distribution de la concentration des particules solides". Leurs expériences portent aussi sur l'écoulement chargé de corps en suspension dans une conduite et la méthode de mesures est la même (la méthode optiquo-photographique) comme [23]. Les auteurs ont effectué les mesures de caractéristiques turbulentes du fluide - valeurs efficaces de composantes de vitesse turbulente, longitudinales $\sqrt{\overline{u'^2}}$ et verticales $\sqrt{\overline{v'^2}}$ - dans la zone de la suspension et dans celle de l'eau pure. Les auteurs considèrent le rapport entre les valeurs locales de $\sqrt{\overline{u'^2}}$ et $\sqrt{\overline{v'^2}}$ dans la zone de la suspension et les valeurs moyennes de ces grandeurs dans la zone de l'eau pure, comme le critère de la modification de la turbulence, due aux particules en suspension. (Malheureusement, ils ne précisent pas la méthode du calcul de la valeur moyenne de $\sqrt{\overline{u'^2}}$ et $\sqrt{\overline{v'^2}}$ dans la zone de l'eau pure).

On peut remarquer que ce critère, basé sur le rapport entre une valeur locale et une valeur globale n'est pas tout à fait correct. En fait, si l'on parle de modification de la turbulence, due à la présence de particules solides en suspension, il faudrait comparer les valeurs correspondantes dans tous les deux cas - l'eau pure et la suspension -

Les auteurs concluent que la turbulence diminue en fonction de la concentration de particules solides en suspension. Ils interprètent la loi expérimentale trouvée pour la décroissance de composantes verticales de vitesse turbulente par l'expression

$$\left[\sqrt{\overline{v'^2}}\right]_s = \left[\sqrt{\overline{v'^2}}\right]_o \left(1 - \frac{C}{C_{max}}\right)^K$$

ou :

$\left[\sqrt{\overline{v'^2}}\right]_s$ — la valeur locale de $\sqrt{\overline{v'^2}}$ dans la zone de la suspension (dans un point donné).

C - la concentration locale correspondante.

$\left[\sqrt{\overline{v'^2}}\right]_0$ - la valeur moyenne de $\sqrt{\overline{v'^2}}$ dans la zone de l'eau pure.

$C_{max}$ - la concentration maximum possible des particules données.

L'exposant (K) dépend, d'après les auteurs, du caractère de la couche limite au voisinage d'une particule solide. D'après leur expérience $K \approx 0,8$ .

Les résultats de mesures montrent que, si la concentration de particules tend vers $C_{max}$ la composante verticale de la vitesse turbulente tend vers zéro (ce qui est traduit par l'expression analytique donnée). Ce résultat est logique, parce que la capacité de suspension d'un écoulement est déterminée principalement par $\sqrt{\overline{v'^2}}$ . Si $C \to C_{max}$ la turbulence n'est plus capable de maintenir les particules solides en suspension et elles tombent au fond.La turbulence dans cette zone est très atténuée, c'est pourquoi on trouve $\sqrt{\overline{v'^2}} \approx 0$

. Les auteurs constatent aussi une modification de la courbe de concentration de particules solides dans une section de la conduite, ce qui est la conséquence du changement de la turbulence, dû à la présence de particules en suspension.

Pour les faibles concentrations de matériaux en suspension, la courbe expérimentale $C(y)$ peut être exprimée par la loi de SCHMIDT-ROUSE mais à partir d'une certaine valeur de $c$ (dans leur expérience, avec les particules en verre de diamètre 0,85 mm, cette valeur "critique" est $C \approx 0,05$) la courbe expérimentale change d'allure. (Ce résultat confirme l'hypothèse de BOUVARD [7], que "au delà d'une certaine quantité de matériaux en suspension, on doit trouver que la forme de la courbe des concentrations relatives varie, ce qui proviendrait d'une variation des propriétés de la turbulence").

Concluons que les résultats expérimentaux de cette étude, qualitativement, semble tout à fait logique, tandis qu'au point de vue quantitatif, ils ne sont pas très précis. On peut se demander, en effet, si cette méthode optiquo-photographique est suffisamment précise pour les mesures aussi délicates comme celles de turbulence dans le cas de forte concentration des particules solides, laquelle est forcément impliquée dans l'étude de la modification de turbulence.

Enfin, AWAYA et KUSUDA [2] étudient la turbulence, dite "parasite", due à la présence de particules solides en suspension dans un écoulement. Ils ont effectué l'étude expérimentale de ce phénomène dans une conduite verticale, ayant mesuré, par

la méthode du fil chaud, la turbulence créée par les particules solides en suspension dans l'écoulement de l'eau. Les auteurs donnent les conclusions suivantes sur leur étude expérimentale :

a) La turbulence, due à la suspension de particules solides est localement isotrope.

b) Le spectre d'énergie turbulente s'étend jusqu'aux assez grandes valeurs de nombre d'onde $K$, de telle façon qu'on y retrouve la zone d'inertie avec la loi $K^{-5/3}$. (Il conviendrait de dire que les auteurs prétendent avoir trouvé expérimentalement cette loi, ainsi que la loi de HEISENBERG en $K^{-7}$ pour la zone de dissipation visqueuse, parce que cette conclusion des auteurs est en fait assez surprenante : la dispersion des points expérimentaux est tellement grande qu'on peut tracer les droites avec les pentes différentes, selon le sentiment).

c) En évaluant les termes de l'équation dynamique, les auteurs concluent que, pour cette turbulence "parasite", les effets de la gravitation et de la résistance du fluide au mouvement de particules solides sont prédominants par rapport à l'effet d'inertie.

d) D'après les auteurs, la précision des mesures au fil chaud n'est pas suffisante pour l'étude de ce phénomène et, par conséquent, il faut envisager une autre méthode expérimentale.

(Il faut remarquer que la température de l'eau, durant un essai, a varié entre 12,3 °C et 13,5 °C, ce qui peut expliquer l'imprécision des mesures au fil chaud).

A propos de cette étude, nous voulons mentionner la possibilité de l'effet destabilisatoire des particules solides dans un écoulement : les corps en suspension peuvent accélérer la transition d'un régime laminaire à un régime turbulent, par le mécanisme de la création de turbulence parasite.

## 2.3 - Conclusion.

En dépit de son grand intérêt et des efforts des chercheurs, le problème de la modification de turbulence en présence des particules solides en suspension est loin d'être définitivement éclairci et résolu au point de vue théorique, à cause de sa complexité. Aucune méthode d'approche ne paraît pouvoir être vraiment satisfaisante.

Cependant, dans le cadre des études théoriques actuelles sur ce sujet, le travail de BARENBLATT semble le plus important et ses résultats les plus réalistes. Son concept physique du phénomène est clair et logique - l'effet principal des particules solides sur la dynamique de l'écoulement porteur est lié au travail de la mise en suspension - Ce qu'on peut objecteur, pourtant, à ce concept, c'est la question suivante : les autres aspects de l'influence des particules solides en suspension sur la turbulence sont-ils vraiment négligeables ? A notre avis, ils ne le sont pas, ce qui sera discuté dans le paragraphe suivant. Le critère de la modification de l'énergie turbulente en présence de particules solides en suspension, défini par BARENBLATT, et qui peut être interprété comme le rapport entre l'énergie nécessaire pour maintenir les particules en suspension et la production d'énergie turbulente, a la signification physique très logique. Nous reviendrons à cette question au chapitre IV, dans le contexte des résultats expérimentaux de notre étude.

En ce qui concerne l'étude de HINO, nous pensons que son concept théorique est très discutable. Il est trop obsédé par l'idée de prouver théoriquement que la turbulence en présence de particules neutres en suspension doit augmenter. Son hypothèse que la dissipation visqueuse est réduite en présence des matériaux solides en suspension à cause de la diminution de l'espace occupé par le liquide, et que cet effet est prédominant par rapport à la dissipation supplémentaire due aux forces de la résistance du fluide au mouvement relatif des particules, est très contestable. En tous cas, notre expérience est en contradiction avec la théorie de HINO (chap. IV).

Au point de vue de la recherche expérimentale du phénomène, nous avons déjà constaté que la plupart des études ne donne pas la réponse à la question de la modification de turbulence en présence de particules solides en suspension. Il faut, pourtant, souligner que VANONI et FIELD, ayant étudié les phénomènes tout à fait différents, tirent, indirectement, la même conclusion sur le caractère du changement de la turbulence. Cette conclusion coïncide avec les résultats de mesures directes de turbulence en présence des corps en suspension, effectuées par PECHENKIN et VEDENEEV : la turbulence diminue à cause de la présence de particules solides en suspension. Pourtant, cet accord de la majorité des chercheurs qui ont travaillé dans ce domaine, sur le caractère de la modification de turbulence en présence de particules solides en suspension, ne représente qu'un premier pas dans la connaissance de ce sujet. Il reste toujours à étudier, avec les méthodes expérimentales plus précises et les mesures plus complètes (à cet égard la méthode de PECHENKIN et VEDENEEV n'est pas satisfaisante à cause de l'impossibilité de mesures de

spectre turbulent) le mécanisme de l'influence de corps en suspension sur la turbulence.

En tout cas, compte tenu de la complexité de ce sujet et de l'état actuel de la recherche, il reste indispensable de confronter les résultats théoriques et expérimentaux et même de rechercher dans ces derniers, l'inspiration d'un schéma simplifié, mais réaliste d'analyse théorique du problème.

## 3 - DIFFERENTS ASPECTS DE L'INFLUENCE DE PARTICULES SOLIDES EN SUSPENSION SUR LA TURBULENCE DE L'ECOULEMENT PORTEUR.

### 3.1 - Cas général.

D'après l'état actuel de la connaissance de ce phénomène, on peut distinguer, dans le cas général, les aspects suivants de l'influence de particules solides sur la turbulence de l'écoulement porteur :

a) Transformation d'énergie cinétique du fluide en énergie potentielle de particules solides, due au travail de la mise en suspension de particules, effectué par la turbulence.

b) Effet d'inertie de particules solides : les particules ne peuvent pas répondre à toutes les fluctuations de vitesse du fluide et, par conséquent, elles ne suivent pas parfaitement le mouvement du fluide.

c) "Crossing-trajectories effect" - une particule solide, à cause de sa tendance de chute, tombe d'un tourbillon à un autre, tandis qu'une particule fluide reste dans un même tourbillon pendant toute sa durée de vie.

d) Dissipation supplémentaire d'énergie turbulente, due à la résistance du fluide au mouvement relatif de particules solides.

e) Réduction de l'espace effectif du fluide, parce que les particules solides occupent un certain volume dans le fluide.

f) Transformation de gros tourbillons en plus petits, par un mécanisme lié au glissement de particules par rapport au fluide.

g) Modification de la viscosité effective : la viscosité dynamique du

mélange fluide-particules solides est plus grande que celle du fluide pur.*) Suivant BATCHELOR [4], même si l'on admet que les particules solides suivent parfaitement la translation et la rotation du fluide environnant, la déformation d'un élément du fluide sera influencée et perturbée par leur présence. En conséquence, la dissipation visqueuse sera plus grande, ce qui revient à conclure que la viscosité dynamique effective du mélange fluide-particules solides est plus grande que celle correspondante au fluide pur.

h) Création de la turbulence parasite, due au mouvement relatif de particules solides dans le fluide.

Evidemment, ces différents effets ne sont pas indépendants entre eux, mais ils sont liés étroitement et ne représentent que des différents aspects, d'une influence globale de particules solides en suspension sur la turbulence de l'écoulement porteur. Entre plusieurs de ces effets existent des relations directes, de cause à effet. A cause de l'effet d'inertie et de "crossing-trajectories effect", les particules solides ne suivent pas le mouvement du fluide et sont, par conséquent, en mouvement relatif par rapport au fluide. D'autre part les effets (d) et (h) sont les conséquences directes de ce mouvement relatif, c'est-à-dire (d) et (h) sont les conséquences de (b) et (c).

Par intuition, on dirait qu'il y a une liaison entre les effets (e) et (f) - en fait, on peut supposer que les gros tourbillons se transforment en plus petits parce que leur mouvement est modifiée d'une certaine manière par la présence de particules solides en suspension - En tout cas, nous sommes d'avis que, si l'effet de la réduction de l'espace effectif du fluide est significatif, il agit plutôt sur les gros tourbillons que sur les plus petits, d'après l'hypothèse de HINO.

---

*) Ce phénomène a été considéré théoriquement par EINSTEIN [4], qui a proposé la relation suivante (avec la condition restrictive $C \ll 1$ ) :

$$\mu = \mu_0 \ ( 1 + \alpha c )$$

où : $\mu$ et $\mu_0$ désignent, respectivement, les coefficients de la viscosité dynamique du mélange liquide-particules solides et du liquide pur.

C - la concentration de particules solides.

$\alpha$ - constante, approximativement égale à 2,5.

Comme nous avons souligné par le titre de ce paragraphe, ces 8 effets possibles ont lieu dans le cas général d'une suspension de particules solides dans un écoulement turbulent. Dans les cas particuliers, suivant le caractère de la suspension, quelques uns de ces effets sont négligeables, les autres, par contre, sont accentués. Nous allons d'abord définir les critères de la classification des suspensions et après procéder à l'analyse qualitative de la signification des effets définis, dans les cas particuliers de suspension.

## 3.2 - Cas caractéristiques de suspension de particules solides dans un écoulement turbulent.

La première caractéristique importante d'une suspension, c'est la concentration de particules solides dans le fluide. Evidemment, on peut distinguer les cas de forte et faible concentration.

La deuxième caractéristique importante, c'est le rapport entre les densités de particules solides et du fluide $\left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)$. Les cas particuliers sont $\frac{\rho_s}{\rho_f} = 1$ et $\frac{\rho_s}{\rho_f} > 1$ .

Comme nous avons vu précédemment, les critères pour distinguer les cas particuliers d'une suspension dans un écoulement turbulent sont basés sur les rapports entre les caractéristiques de particules solides et celle de la turbulence. En fait, il faut considérer les échelles, spatiale et temporelle, caractéristiques des plus petits tourbillons. Nous avons vu qu'il y avait deux possibilités pour caractériser ces tourbillons - la microéchelle $(\lambda)$, proposée par FORTIER et l'échelle de la dissipation $(\eta)$ , proposée par SNYDER et LUMLEY. Nous avons adopté cette dernière $\eta = \left[\nu^3/\epsilon\right]^{1/4}$ et le temps caractéristique correspondant $t_d = \left[\nu/\epsilon\right]^{1/2}$, parce que ce sont les grandeurs qui correspondent aux plus petits tourbillons. Il faut donc considérer le rapport entre le diamètre de particules et $\eta$ et celui entre la constante de temps de particules et $t_d$: $\frac{d}{\eta}$ et $\frac{\tau}{t_d}$

On peut distinguer deux cas extrêmes :

$$\frac{d}{\eta}\ ,\ \frac{\tau}{t_d}\ \cdots \ll 1 \qquad \text{et} \qquad \frac{d}{\eta}\ ,\ \frac{\tau}{t_d}\ \cdots \geq 1$$

Le premier cas comprend la suspension des particules solides très fines, avec la constante de temps très petite. D'après la définition $\tau = \frac{w_s}{g}$, (puisque, dans ce cas, on pourrait admettre le régime de Stokes), la vitesse de chute de particules est alors très faible, d'où on peut déduire que la densité de particules est très proche de cette du fluide. La condition $\frac{d}{\eta} \ll 1$ , $\frac{\tau}{t_d} \ll 1$ impose donc la condition $\frac{\rho_s}{\rho_f} \sim 1$.

Il faut souligner que ce cas est caractérisé par deux conditions simultanées $\left(\frac{d}{\eta}, \frac{\tau}{t_d}\right) \ll 1$ . En effet, on pourrait bien imaginer une suspension de particules solides très fines, dont la densité serait très supérieure à celle du fluide $\frac{\rho_s}{\rho_f} \gg 1$. Par conséquent, la vitesse de chute et la constante de temps de particules sont considérables. Ce cas est donc caractérisé par $\frac{d}{\eta} \ll 1$, $\frac{\tau}{t_d} \sim 1$ (Celui-ci a fait l'objet d'étude de SNYDER et LUMLEY [24], qui ont fait les essais avec les particules solides dans l'air. Ils ont eu $\frac{d}{\eta}$ entre 0,10 et 0,20 et $\frac{\tau}{t_d}$ entre 2 et 4).

Le deuxième cas $\left(\frac{d}{\eta}, \frac{\tau}{t_d} \cdots \geq 1\right)$ est plus général et comprend les suspensions de particules solides de l'ordre de grandeur ou supérieures aux dimensions des plus petits tourbillons.

3.3 - Analyse qualitative de la signification des différents aspects de l'influence de particules solides sur la turbulence dans les cas caractéristiques de suspension.

L'effet du premier paramètre d'une suspension - la concentration - est le plus clair et évident :

- Si la concentration est faible, tous les aspects de l'influence de particules solides sur la turbulence (a) - (h), peuvent avoir lieu, mais leur effet global sera pratiquement négligeable. Par conséquent, il n'y aura pas de modification significative de la turbulence.

- Si la turbulence est forte, par contre, tous les effets individuels, (a) - (h), peuvent être significatifs, aussi comme l'effet global. Par conséquent, la turbulence sera modifiée.

L'effet de rapport de densité de particules et du fluide est assez évident :

- Si $\frac{\rho_s}{\rho_f} = 1$ , les particules solides ne sont pas soumises à l'accélération de la gravitation et, par conséquent, il n'y a pas de perte d'énergie turbulente pour les maintenir en suspension (a) et "crossing-trajectories effect" (c) ne se produit pas.

- Si $\frac{\rho_s}{\rho_f} = 1$ et $\frac{d}{\eta} \ll 1$ , $\frac{\tau}{t_d} \ll 1$ , une particule solide peut être assimilée à une particule fluide. Par conséquent, aucun des effets, décrits à 3.1 n'a lieu, excepté (e) et (g).

Dans le cas $\frac{\rho_s}{\rho_f} > 1$, si $\frac{d}{\eta} \ll 1$, $\frac{\tau}{t_d} \ll 1$, la densité de particules doit être proche à celle du fluide. On aura donc les effets (a) et (c) mais ils seront négligeables. Par contre, si $\frac{d}{\eta} \geq 1$ et $\frac{\tau}{t_d} \geq 1$, une particule solide ne peut pas être assimilée à une particule fluide. En conséquence, les particules solides ne suivent pas parfaitement le mouvement du fluide et ainsi elles provoquent les effets (b), (c), (d), (f), (h). L'effet (a) dépend évidemment du rapport de densités $\left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)$ - pour $\frac{\rho_s}{\rho_f} = 1$ il n'existe pas -

## 4 - PRINCIPAUX OBJECTIFS DE L'ETUDE.

L'idée de base, dans notre étude de problème de turbulence en présence de particules solides en suspension, est que les matériaux en suspension exercent une réaction sur la turbulence et ainsi la modifient.

L'objectif principal a consisté à mettre en évidence les modifications de la turbulence en présence de particules solides en suspension et de les déterminer quantitativement, par des mesures aussi précises que possible.

La conception de notre étude expérimentale a consisté donc à comparer les caractéristiques de la turbulence dans deux cas - à l'eau pure et en présence de particules solides. En admettant l'hypothèse que la turbulence créée par notre dispositif expérimental est exactement la même dans les deux cas *), toute modification de ses caractéristiques, par rapport à l'eau pure, résulte de l'influence de particules solides sur la turbulence.

Dans ce but, nous avons effectué les mesures de turbulence, en présence de billes en suspension, par deux méthodes différentes. Le chapitre III est consacré aux mesures au fil chaud, tandis que les expériences relatives au capteur de pression font l'objet du chapitre IV.

Nous avons essayé, en analysant les résultats expérimentaux, de mettre en évidence leur signification physique dans le contexte de la connaissance actuelle sur ce sujet.

---

*) Etant donnée la conception de notre installation expérimentale, cela revient à considérer la cinématique de la création de la turbulence comme constante, indépendante du contenu de la cuve (l'eau pure ou la suspension de particules solides) et définie par les paramètres du mouvement de la plaque. Evidemment, dans le cas de la suspension de particules solides, la charge totale supportée par la plaque est plus grande et, par conséquent, le moteur doit fournir plus d'énergie pour maintenir le même mouvement de la plaque.

# CHAPITRE II

## INSTALLATION EXPERIMENTALE DE BASE ET CARACTERISTIQUES DE LA TURBULENCE CREEE

### 1 - DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE.

Comme nous avons déjà remarqué, notre étude expérimentale a été facilitée par l'existence d'une installation de base, conçue spécialement pour des essais de turbulence dans l'eau. Il s'agit de la "cuve à turbulence", conçue par BOUVARD et DUMAS [ 8 ]. Puisque la description détaillée de cette installation est donnée dans [ 7 ], nous voulons seulement rappeler ses caractéristiques essentielles :

La partie fondamentale est constituée par une cuve carrée en plan, de 80 cm de côté, avec les parois en verre, munie au fond d'un batteur horizontal. C'est une plaque perforée de 64 trous de 4,5 cm de diamètre, également répartis. Celle-ci est mise en mouvement alternatif par un système bielle-manivelle entraîné à vitesse constante par un moteur à régulation électronique. La fréquence et l'élongation du mouvement de la plaque sont réglables.

L'énergie dissipée dans la cuve est évacuée par circulation d'eau froide dans un serpentin placé à la partie inférieure de la cuve. Le système est également réglé pour conserver au milieu une température constante (23°C dans nos essais) avec une précision suffisante (1/10 de degré), pour maintenir la viscosité à une valeur bien définie et surtout permettre les mesures au fil chaud dans de bonnes conditions. La turbulence, créée dans la cuve, est sans vitesse moyenne. La méthode de base de mesure de la turbulence dans la cuve est la méthode du fil chaud. Comme ce procédé

implique l'existence d'une vitesse moyenne relative entre l'élément sensible et le fluide, cette vitesse est artificiellement créée en plaçant la sonde à fil chaud à l'extrémité d'un bras tournant à vitesse constante et réglable (entre 0 et 5 m/s) à l'aide d'un dispositif électronique.

La vue générale de l'installation expérimentale est représentée sur la photographie - figure II-1 - et sur la figure II-2.

## 2 - PROCEDE EXPERIMENTAL DE MESURE DE TURBULENCE.

### 2.1 - Mesure de vitesses turbulentes.

La mise au point de la méthode du fil chaud a fait l'objet de l'étude de BOUVARD [7]. Dans ce but, il a dû résoudre un certain nombre de problèmes et surmonter plusieurs difficultés (le choix entre la méthode à intensité constante ou à température constante ; le choix du fil ou du film, le choix de type de sonde à film chaud). Comme notre étude expérimentale représente, au point de vue des mesures de turbulence, une suite de l'étude de BOUVARD, nous avons profité de son expérience.

Ainsi, nous avons procédé aux mesures au fil chaud avec l'anémomètre à température constante "Thermo system", en utilisant les sondes coniques de la même marque. Nous avons effectué les mesures au fil chaud avec la surchauffe de 4 %. Les mesures de turbulence ont été effectuées sans l'utilisation du linéarisateur. La première étape des essais, consiste à établir la relation entre la tension du courant de sortie de l'anémomètre (E) et la vitesse moyenne de déplacement de la sonde (V), entraînée par le bras tournant. La méthode d'étalonnage a consisté à mesurer E pour cinq valeurs de V autour de $V_o$ (la vitesse constante, adoptée pour les mesures). La vitesse $V_o$ étant égale, dans notre cas, à 1,50 m/sec, l'intervalle d'étalonnage comprenait les vitesses entre 1,30 et 1,70 m/sec. Ces cinq points d'étalonnage E(V) se groupaient pratiquement toujours, au cours de nos mesures, sur une droite. La courbe E (V) dans cet intervalle est pratiquement confondue avec la tangente à $V_o$, ce qui confirme la validité du principe d'étalonnage et qui sert de base à la détermination de la vitesse turbulente. D'ailleurs, BOUVARD a montré [7], que l'erreur faite par la linéarisation locale de la courbe E (V) est négligeable devant les autres erreurs expérimentales, même si l'on considère des taux de turbulence de l'ordre de 20 %. (Remarquons que nous avons eu le taux maximum de l'ordre de 10 %).

La chaine électronique de mesure de vitesse turbulente est schématisée sur la figure 3, chaine A. Il faut souligner l'importance de l'application de voltmètre-intégrateur, conçu et mis au point au service électronique de notre laboratoire.

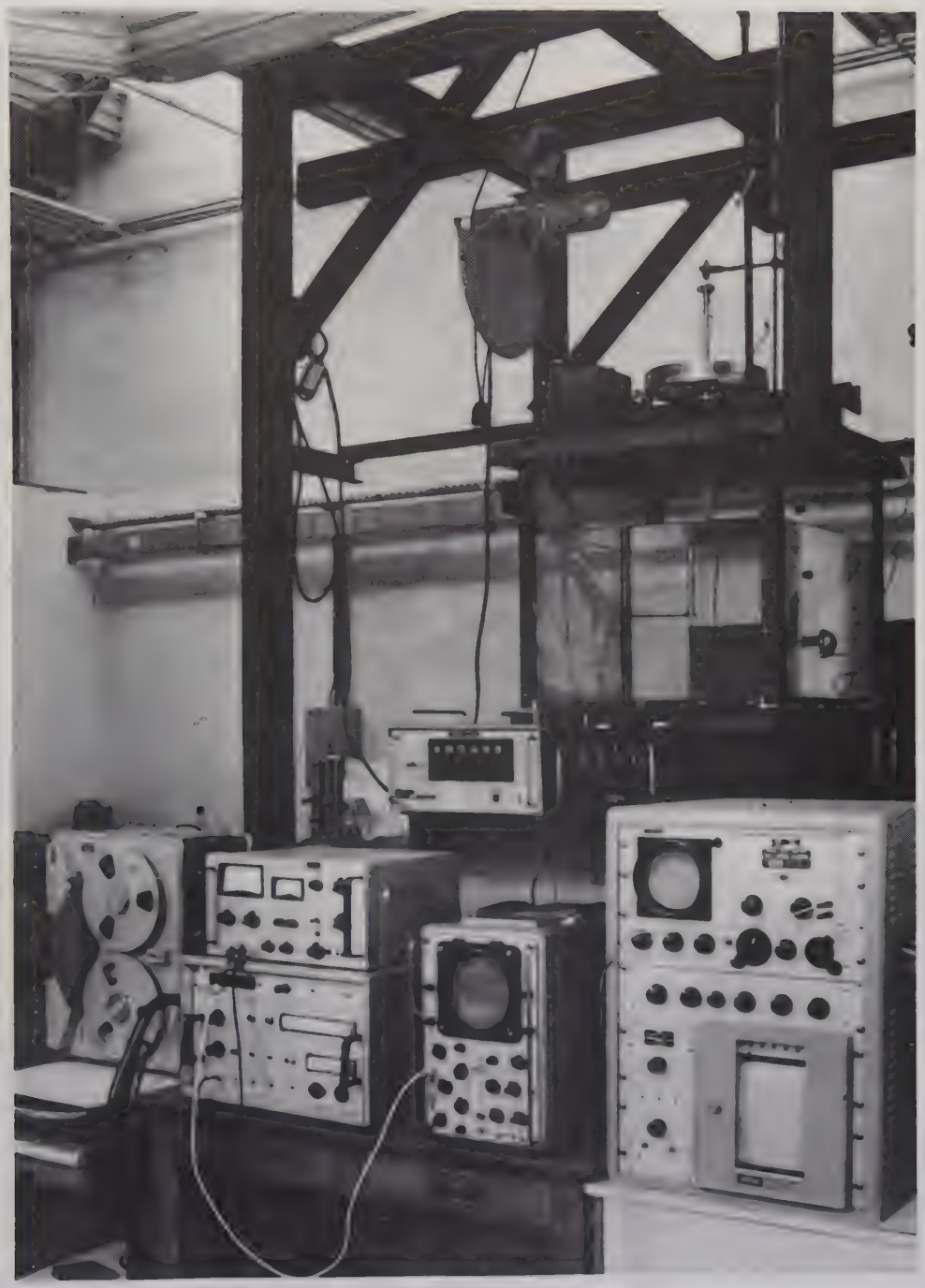
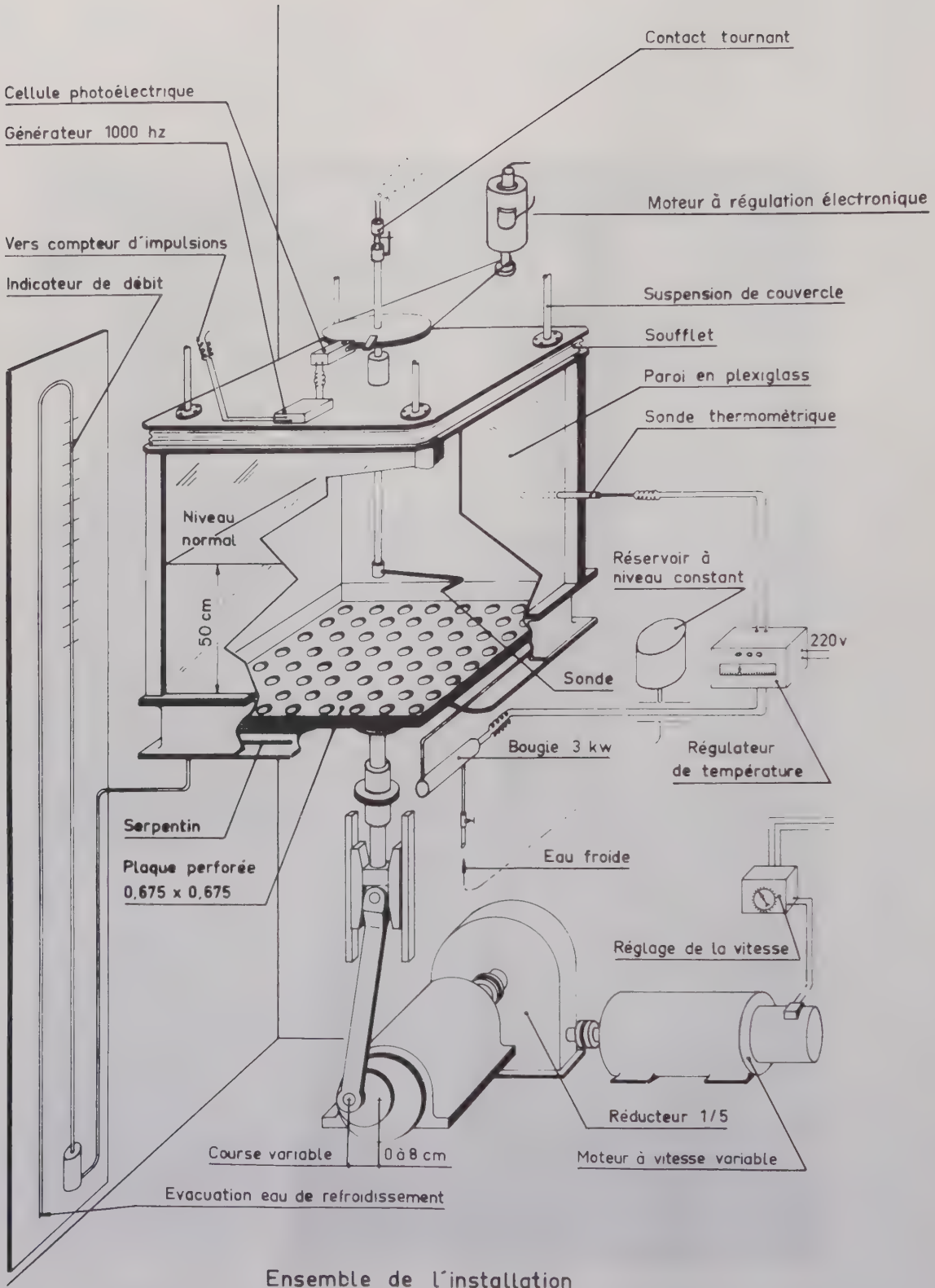


FIG. II-1 VUE GENERALE DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE




Ensemble de l'installation

Fig. II-2

Cet appareil effectue l'intégration du signal turbulent (ou de sa valeur efficace) avec une grande précision, correspondant avec sa définition théorique.

2.2 - Analyse spectrale su signal turbulent.

Nous avons effectué l'analyse spectrale dans notre étude par la méthode habituelle, à savoir : La décomposition d'un signal turbulent est réalisée en utilisant un analyseur de fréquences temporelles. Celles-ci sont liées aux fréquences spatiales par relation classique de Taylor

$$K = \frac{n}{V}$$

où (K) désigne le nombre d'onde, (n) la fréquence temporelle lue sur l'analyseur et (V) la vitesse moyenne relative entre l'élément sensible et le fluide (dans notre cas, la vitesse du bras tournant). L'utilisation d'un analyseur de fréquence temporelle pour la décomposition du signal provenant de mesure de la turbulence dans l'eau, pose, en général, le problème des basses fréquences. Celles-ci sont beaucoup plus basses que dans l'air, ce qui est dû notamment au fait que les vitesses moyennes utilisées dans l'eau sont, dans la plupart des cas, beaucoup plus réduites que dans l'air. Comme les analyseurs, en général, ont une limite inférieure ($\approx$ 20 hz) qui n'est pas suffisamment basse pour atteindre les basses fréquences de turbulence dans l'eau il faut trouver une solution permettant de surmonter ce problème. Dans la conclusion de son étude [7], BOUVARD a proposé une solution :

"Il faut, soit disposer d'un analyseur de fréquence descendant vers les fréquences très basses, soit d'un système d'enregistrement magnétique à double vitesse de déroulement, permettant de changer artificiellement la fréquence des fluctuations à étudier. Il est certain que l'enregistrement des signaux sur bande magnétique permettrait d'améliorer assez considérablement le processus expérimental. L'étude d'un spectre demande plusieurs heures au cours desquelles l'ensemble de la chaine de mesure peut dériver. Par contre, il suffirait d'enregistrer le signal sur quelques minutes pour ensuite procéder au dépouillement dans de très bonnes conditions, sans risquer de dérive à cause de l'élément sensible lui-même".

Cette idée a été réalisée au cours de notre étude. Notre laboratoire dispose de l'enregistreur sur bande magnétique "AMPEX" avec 6 vitesses de déroulement. Dans le cadre de nos expériences, on enregistrait les signaux turbulents avec une faible vitesse de déroulement (3 3/4 IPS) pour les reproduire après à vitesse 8 fois plus grande (30 IPS), ce qui a permis d'étendre, pratiquement, toute la gamme spectrale de la turbulence créée dans la cuve.

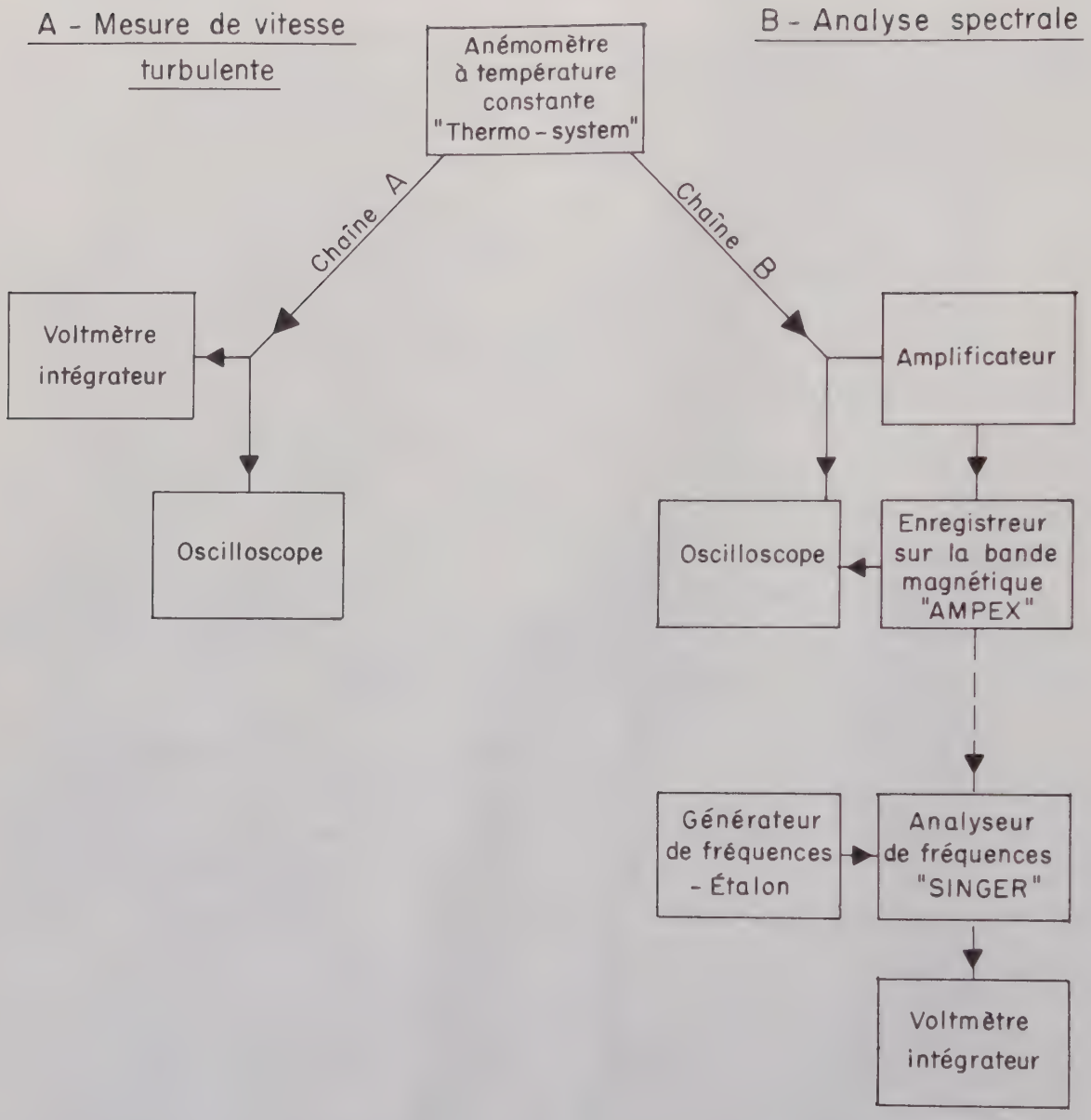



Fig. II-3 – Schéma synoptique du système de mesure de turbulence par la méthode du fil chaud.

Nous avons utilisé, pour nos mesures, l'analiseur "SINGER", dont la gamme d'exploration est comprise entre 20 et 20.000 hz. Le signal de sortie de l'analyseur était ensuite envoyé dans le voltmètre-intégrateur, sans lequel la lecture serait très problématique : les fluctuations instantanées de la grandeur mesurée sont très importantes.

Le schéma synoptique du système de mesure est présenté par la figure II-3 (chaine B).

## 3 - CARACTERISTIQUES DE LA TURBULENCE, CREEE DANS LA CUVE.

Grâce aux caractéristiques particulières de notre installation expérimentale - volume limité de la cuve et caractère confiné de l'écoulement - et grâce à la précision du système électronique de mesure, on peut procéder aux mesures, relativement très complètes et très précises, de turbulence dans la cuve. Ainsi, on arrive à déterminer les grandeurs classiques de la turbulence - l'intensité de vitesse turbulente, microéchelle, échelle intégrale et spectre d'énergie. En ce qui concerne le caractère de la turbulence, créée dans la cuve, on peut dire que c'est une turbulence pure, sans vitesse moyenne, homogène dans un plan horizontal et non-homogène suivant la profondeur, parce que la vitesse turbulente (u') décroît en fonction de la distance de la plaque.

L'intensité de turbulence, créée dans la cuve, dépend des paramètres du mouvement de la plaque : fréquence et élongation. L'effet de la variation de l'élongation est montré sur la figure II-4 où sont présentées les courbes u'(y) pour deux élongations différentes de la plaque (2 x 4 cm et 2 x 5 cm).

Tous les autres essais de notre étude expérimentale sont réalisés avec l'élongation fixe - 2 x 4 cm) en variant la fréquence du mouvement de la plaque. L'effet de variation de la fréquence ($F_{GEN}$) est montré sur la figure II-5, avec les courbes u'(y) pour cinq fréquences différentes - 2, 3, 4, 5, 6 hz.

On peut constater que u' mesuré, varie entre 18 cm/s (profondeur 40, $F_{GEN} = 6$) et 3,5 cm/s (profondeur 5 cm, $F_{GEN} = 2$).

La microéchelle calculée à partir des spectres, varie dans la cuve entre 1,5 mm (au fond) et 4 mm (vers la surface libre). Par conséquent, le nombre de Reynolds de turbulence $R_E = \frac{u'\lambda}{\nu}$ varie entre 140 et 270.

Au point de vue des spectres d'énergie turbulente, on trouve la zone

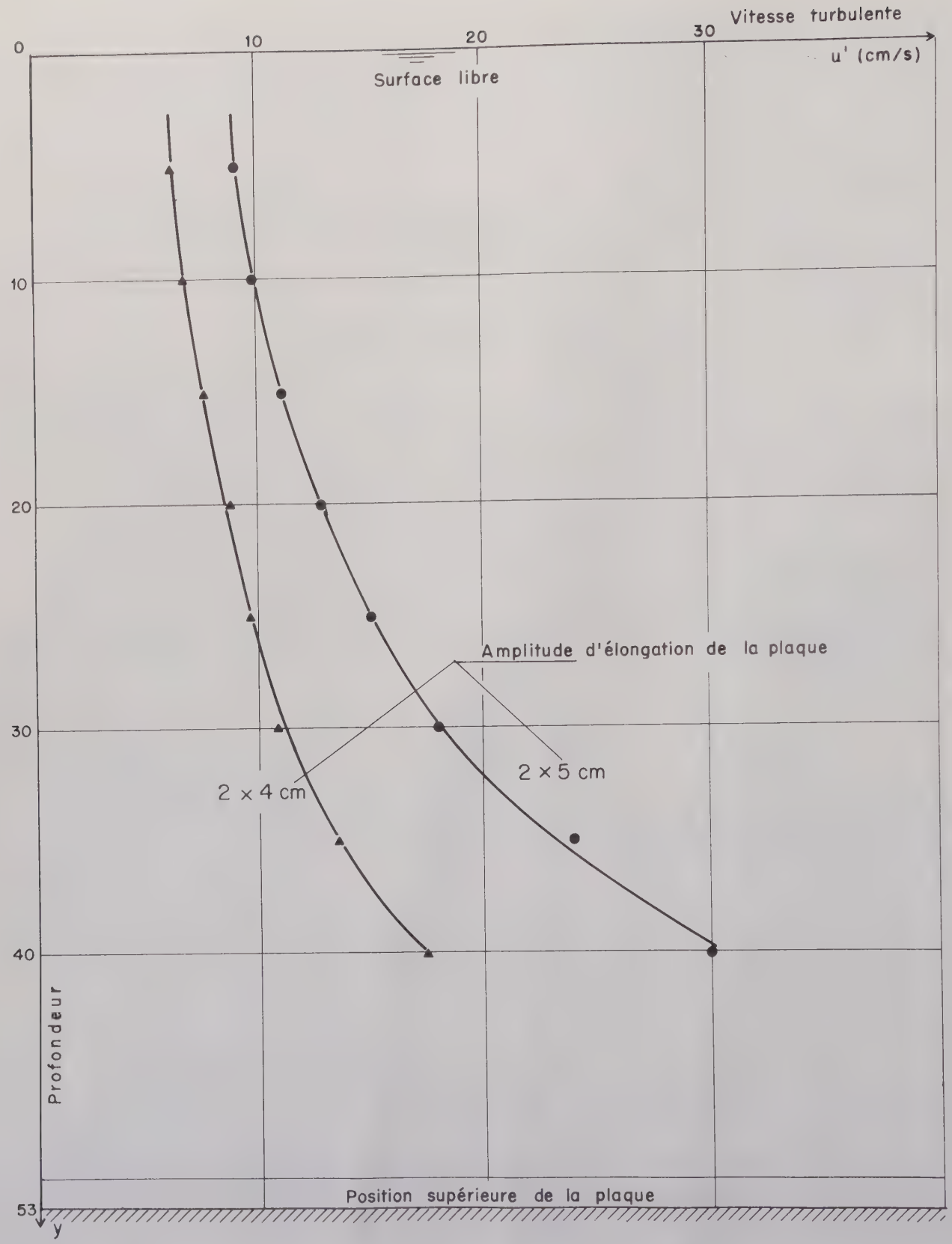



Fig. II - 4 – Relation entre l'amplitude d'élongation de la plaque et l'intensité de la turbulence créée dans la cuve - ( $F_{GEN}$ = 6 hz ).

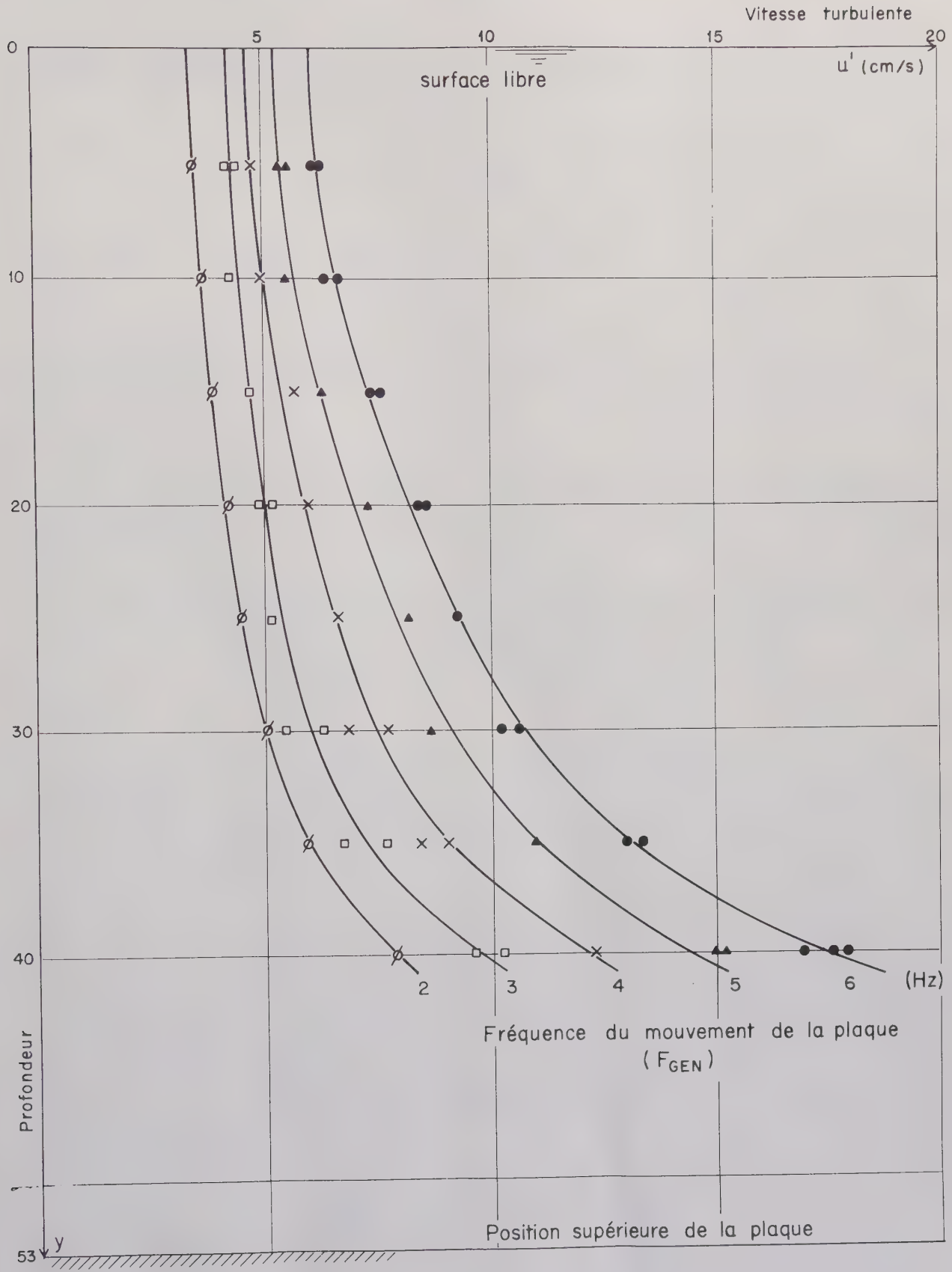



Fig. II - 5 — Courbes de vitesses turbulentes en fonction de la profondeur pour les différentes intensités de la turbulence créée.

d'inertie dans tous les cas indiqués, mais de largeur variable, représentée dans la courbe de densité spectrale par la droite de Kolmogonoff (la pente - 5/3).

## 4 - CONSIDERATIONS THEORIQUES SUR LA TURBULENCE CREEE DANS LA CUVE.

### 4.1 - Diffusion d'énergie turbulente.

La turbulence dans la cuve, à un niveau donné, correspond à la diffusion d'énergie, provenant du générateur, de fond de la cuve. Le mouvement statistiquement permanent du fluide, à un niveau donné de la cuve, résulte de l'équilibre entre l'apport d'énergie turbulente par diffusion du fond et la destruction par viscosité de l'énergie ainsi apportée.

Suivant A. CRAYA, en admettant l'hypothèse de l'isotropie locale, on peut exprimer cet équilibre énergétique par la relation :

$$\frac{3}{2}\ \frac{d}{dy}\left(\epsilon\ \frac{dE}{dy}\right) = 15\nu\ \frac{E}{\lambda^2} \qquad \text{(II-1)}$$

où : $E = u'^2$ et $\epsilon$ désigne le coefficient de diffusion relatif à l'énergie.

BOUVARD a démontré que, si l'on admet les hypothèses :

$$\epsilon = C^{te} \qquad \text{et} \qquad E\,\lambda^2 = C^{te}$$

l'équation (II-1) peut être résolue. Ainsi, on détermine théoriquement E(y), et on obtient une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux [ 7 ].

### 4.2 - Spectre d'énergie turbulente.

Considérons le bilan d'énergie turbulente à un niveau donné dans la cuve. Pour une gamme spectrale, dans l'espace des ondes, entre 0 et K (K est le nombre d'ondes) l'apport d'énergie par diffusion, provenant du fond de la cuve, peut être exprimé, en introduisant une fonction spectrale correspondante D(K), par la somme $\int_0^K D\,dk$ . Cette énergie est, d'une part, dissipée par viscosité dans la gamme spectrale considérée $\left(2\nu \int_0^K K^2 E\,dK\right)$ et d'autre part, transférée à l'espace spectral entre K et infini $\int_K^\infty F\,dK$ . Le bilan d'énergie peut donc être exprimé en forme spectrale par l'équation :

$$\int_0^K D\,dK = \int_K^\infty F\,dK + 2\nu \int_0^K K^2 E\,dK \qquad \text{(II-2)}$$

puisque

$$\int_K^\infty F\,dK = -\int_0^K F\,dK$$

on peut écrire aussi :

$$\int_0^K D\,dK = -\int_0^K F\,dK + 2\nu \int_0^K K^2 E\,dK \qquad \text{(II-3)}$$

L'équation (II-3) pour la totalité du spectre se transforme en

$$\int_0^\infty D\,dK = 2\nu \int_0^\infty K^2 E\,dK = \epsilon \qquad \text{(II-4)}$$

( $\epsilon$ désigne la dissipation visqueuse totale) parce que

$$\int_0^\infty F\,dK = 0$$

L'équation (II-4) représente, en fait, la forme spectrale de l'équation (II-1) qui exprime l'équilibre entre l'apport d'énergie par diffusion et la dissipation visqueuse, à un niveau donné dans la cuve.

Considérons maintenant la zone d'équilibre, laquelle, par définition, doit être éloignée de la zone de maximum d'énergie (dans le cas de la cuve à turbulence, de la zone d'apport d'énergie par diffusion). Comme la diffusion turbulente est liée aux gros tourbillons (petits K ), la part de l'apport total d'énergie par diffusion entre un K appartenant à la zone d'équilibre et l'infini $\int_K^\infty D\,dK$ est négligeable par rapport à l'apport d'énergie par diffusion jusqu'à la zone d'équilibre $\int_0^K D\,dK$

On peut donc admettre, pour la zone d'équilibre :

$$\int_0^K D\,dK \approx \int_0^\infty D\,dK = \epsilon \qquad \text{(II-5)}$$

Avec cette hypothèse, l'équation (II-3), pour la zone d'équilibre, se transforme en :

$$\int_0^K F\,dK - 2\nu \int_0^K K^2 E\,dK = -\epsilon \qquad \text{(II-6)}$$

Il faut souligner l'analogie des relations spectrales pour la turbulence dans la cuve et les relations classiques de turbulence isotrope et homogène. En effet, si l'on introduit l'hypothèse

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^K E\,dK \approx \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty E\,dK$$

à l'équation classique

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^K E\,dK = \int_0^K F\,dK - 2\nu \int_0^K K^2 E\,dK \qquad \text{(II-7)}$$

on aboutit à l'équation (II-6)

L'équation (II-6) représente le point de départ pour la recherche des lois approchées de spectre dans la zone d'équilibre.

En introduisant une certaine hypothèse pour la relation entre $\int_0^K F\,dK$ et $\int_0^K K^2 E\,dK$ (par exemple, celle de Heisenberg), on trouve la solution de l'équation (II-6) en forme de la loi de Kolmogonoff $E = C^{te}\ \epsilon^{2/3}\ K^{-5/3}$ pour la zone d'inertie et en forme de $E = C^{te}\ K^{-7}$ pour la zone de la dissipation visqueuse.

Nos résultats expérimentaux vérifient bien la loi $(K^{-5/3})$ pour la zone d'inertie, ce qui n'est pas le cas pour la zone de dissipation visqueuse avec la loi $(K^{-7})$. Nous avons trouvé, en effet, $(K^{-4,5})$

4.3 - Pression moyenne.

Ecrivons l'équation de Navier-Stokes pour un point $(x_i)$ dans la cuve :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\,(u_i\,u_j) = -\frac{1}{\rho}\,\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu\,\Delta u_i - g\,\delta_{i3} \qquad \text{(II-8)}$$

Si l'on applique le procédé de Reynolds, compte tenu du fait qu'il n'y a pas de vitesses moyennes dans la cuve, on aurait :

$$u_i = u_i' \qquad\qquad p = \bar{p} + p'$$

La valeur moyenne de l'équation (II-8) est donc :

$$\frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\,(\overline{u_i'\,u_j'}) = -\frac{1}{\rho}\,\frac{\partial}{\partial x_i}\,(\overline{\bar{p}+p'}) + \nu\,\overline{\Delta u_i'} - g\,\delta_{i3} \qquad \text{(II-9)}$$

Comme par définition

$$\overline{u_i'} = 0 \qquad\qquad \overline{\Delta u_i'} = 0 \qquad\qquad \overline{p'} = 0$$

on peut écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\,\overline{u_i'\,u_j'} = -\frac{1}{\rho}\,\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - g\,\delta_{i3} \qquad \text{(II-10)}$$

Si l'on admet l'hypothèse de l'isotropie, qui implique

$$\overline{u_i'\,u_j'} = \overline{u^2}\,\delta_{ij}$$

l'équation (II-10) se transforme en :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\,\overline{u^2} = -\frac{1}{\rho}\,\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - g\,\delta_{i3} \qquad \text{(II-11)}$$

A cause de l'homogénéité sur un plan horizontal de la cuve

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \overline{u^2} = \frac{\partial}{\partial x_2} \overline{u^2} = 0 \qquad \text{(II-12)}$$

et par conséquent

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} = 0 \qquad \text{(II-13)}$$

tandis que, pour la direction verticale, nous avons (en remplaçant $x_3 \equiv y$)

$$\frac{\partial}{\partial y} \overline{u^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - g \qquad \text{(II-14)}$$

et, après l'intégration :

$$\bar{p} + \rho \overline{u^2} + \gamma y = C^{te} \qquad \text{(II-15)}$$

C'est à dire, la pression moyenne dans la cuve n'est pas égale à la pression hidrostatique, à cause de non-homogénéité de turbulence dans le sens de la profondeur.

# CHAPITRE III

## MESURES PAR LA METHODE DU FIL CHAUD

### 1 - RECHERCHE DE LA METHODE EXPERIMENTALE.

Le problème principal de notre étude expérimentale consistait à trouver et mettre au point une méthode de mesure de turbulence en présence de particules solides en suspension. La solution idéale aurait été de garder le système de mesure au fil chaud, déjà mis au point pour l'eau pure, car celui-ci permet les mesures de turbulence les plus complètes et précises, compte tenu de l'état actuel des techniques expérimentales.

Cependant, un problème très difficile et délicat se pose immédiatement, dû à la fragilité de la sonde à film chaud, l'élément essentiel de mesure. Utiliser la méthode du fil chaud pour les mesures de turbulence en présence de particules solides, signifierait exposer l'élément sensible aux heurts avec les corps en suspension et, par conséquent, le casser. Il fallait donc trouver un moyen pour éviter les heurts entre la sonde à film chaud et les particules solides.

La première idée qui nous est venue à l'esprit, était basée sur la dépendence évidente de la concentration des matériaux solides dans la cuve avec le rapport entre vitesse fluctuante et vitesse de chute de billes. En fait, plus les billes sont lourdes et, par conséquent, leur vitesse de chute grande, plus elles auront tendance, pour une turbulence donnée, à se concentrer vers le fond de la cuve. Ainsi, on peut imaginer le cas où toutes les billes sont concentrées dans la partie inférieure de la

cuve, la partie supérieure étant libre, sans corps en suspension. Alors, on pourrait mesurer la turbulence dans cette partie avec le système au fil chaud sans aucun risque. Dans ce cas, il s'agirait, en fait, de comparer la diffusion d'énergie turbulente provenant du fond de la cuve à travers une zone de la suspension des particules solides avec la diffusion dans l'eau pure.

Pour réaliser cette idée il fallait avoir les billes avec la vitesse de chute (W) de même ordre de grandeur que la vitesse fluctuante au fond de la cuve ( $u'_f$ ) . Comme au début de l'étude expérimentale nous avions adopté comme paramètres du mouvement de la plaque la fréquence maximum (6 cycles par seconde) et l'élongation 2 x 5 cm, on avait, d'après les mesures, une vitesse fluctuante au fond de la cuve de 30 cm/s environ ; donc il fallait trouver les billes ayant une vitesse de chute de même ordre de grandeur. Après un bref calcul on a constaté que ce sont les billes en aluminium (densité 2,70) de diamètre 2 mm et les billes en verre (densité 2,20) de diamètre 3 mm, qui satisfaisaient cette condition.

Malheureusement, les résultats des premiers essais étaient décourageants. Les billes en aluminium, à cause de leur petites dimensions, coinçaient dans le système mécanique de l'installation (entre la plaque et le chassis de la cuve). Les billes en verre se cassaient en se heurtant entre elles ou en heurtant le batteur en mouvement.

Mais ces essais ont permis, quand même, de tirer la conclusion que la dimension minimum de particules solides est limitée par la raison mentionnée à 3 mm, et, d'autre part, que le phénomène de heurt entre la plaque en mouvement et le nuage des billes en suspension peut être important. (On verra après l'aspect énergétique de ce phénomène). En conséquence, il fallait disposer de billes de diamètre minimum 3 mm et en matière qui ne se casse pas facilement pour que les billes résistent aux heurts avec la plaque.

Dans ce cadre, nous avons approvisionné pour les mesures définitives les billes en nylon (densité 1,10), de diamètre 5 mm, calibrées. Pour des raisons économiques, la quantité maximum de billes dont on disposait, était limitée à 200.000 billes. Par conséquent, la concentration de billes dans la cuve (le rapport entre le poids total des billes - 14,4 kg - et le poids de l'eau - 500 kg -) était limitée à 3,6 %*).

En ce qui concerne le rapport entre la vitesse turbulente au fond de la

---

* La concentration volumique correspondante est $C_V = \frac{C_M}{\frac{\rho_s}{\rho_f}} = \frac{3,6}{1,1} = 3,3\ \%$

cuve et la vitesse de chute de billes, $\varphi = \frac{u'_f}{W}$ , nous avons décidé de le varier en variant le numérateur ( $u'_f$ ) au lieu de varier le dénominateur ( W ).

Cela signifie que, au lieu d'utiliser les différentes sortes de billes afin de varier W , il faut varier l'intensité de turbulence créée dans la cuve et, par conséquent, la fréquence du mouvement de la plaque. Ainsi, on peut étudier les différents cas de concentration (avec les courbes C(y) différentes) avec une seule sorte de billes, ce qui est, évidemment, plus simple et plus économique.

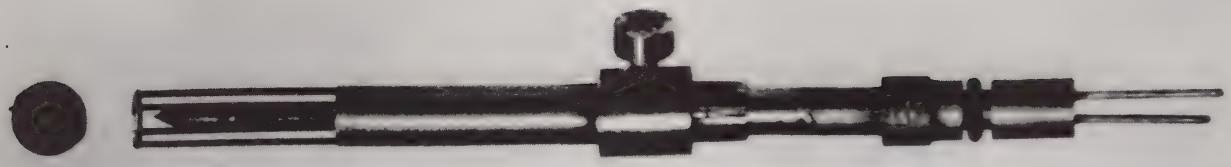
La raison pour laquelle on voulait au début faire tous les essais à la fréquence maximum de la plaque était la suivante : comme le principe de la génération de turbulence dans la cuve consiste à créer un mouvement aléatoire dans le fluide par le mouvement périodique du batteur, on pouvait craindre que, si l'on réduit la fréquence de la plaque, le mouvement de l'eau ne devienne périodique. Or, nous n'avons pas remarqué que le signal turbulent, même pour la fréquence $F_{GEN}$ = 2 hz, devenait moins aléatoire et montrait une tendance quelconque à la périodicité (cette période aurait dû correspondre à la période de la plaque). On pouvait donc créer les différentes intensités de turbulence dans la cuve, en variant la fréquence du mouvement de la plaque.

Nous avons pensé aussi à une autre solution du problème d'application de sondes à film chaud en présence des particules solides en suspension. Notre idée consistait à trouver un moyen quelconque de protection de la sonde contre les chocs des billes. L'étude de la conception et de la réalisation d'un protecteur de sonde à film chaud fait l'objet du paragraphe suivant.

## 2 - APPLICATION D'UN PROTECTEUR DE LA SONDE A FILM CHAUD.

### 2.1 - Principe et réalisation du protecteur.

La conception de protecteur de sonde, compte tenu de la fonction de celle-ci, doit être basée sur le principe de satisfaire deux conditions pratiquement contradictoires - protéger l'élément sensible et perturber le moins possible les mesures de turbulence - En effet, comme l'élément sensible se trouve au sommet du corps de la sonde, pour le protéger il faut mettre quelque chose devant. A cause du mouvement de la sonde, entraîné par le bras tournant, un corps quelconque, situé devant la sonde (en amont), fera un sillage qui sera forcément détecté par l'élément sensible. Comme ce sillage, si la vitesse de rotation du bras tournant n'est pas très faible, sera, lui-même, turbulent, on mesurera aussi une turbulence parasite. C'est pourquoi il faut déterminer la forme du protecteur de façon que la turbulence parasite soit né-



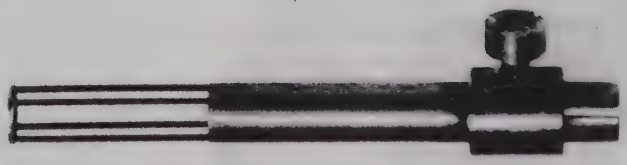


FIG. III-1 - VUE DU PROTECTEUR DE LA SONDE A FILM CHAUD

gligeable par rapport à la turbulence qu'on veut mesurer.

Compte tenu de cette condition, nous avons adopté la forme du protecteur indiquée sur la figure III-1. La partie essentielle de celui-ci consiste en quatre fils, réunis à leur extrémité par un anneau. Cet anneau, qui représente l'orifice central pour la circulation de l'eau, se situe, bien entendu, en amont du sommet de la sonde pour protéger l'élément sensible contre les chocs directs de billes en suspension. La seconde partie du protecteur - le support des fils de protection - consiste en un tube, qui peut coulisser autour du support de la sonde, et une vis de blocage. La position du protecteur par rapport à la sonde (et, par conséquent, la distance entre le sommet de la sonde et l'anneau central) est donc réglable. Les dimensions du protecteur correspondent aux dimensions de la sonde conique "Thermo system" - le diamètre de l'orifice central est 3 mm et la largeur des fils de protection 13 mm.

2.2 - Essais préliminaires avec le protecteur dans l'eau pure.

Les premiers essais avec le protecteur avaient pour but de trouver sa meilleure position par rapport à la sonde, étant donné que, suivant la conception du protecteur, cette position était réglable. Comme il était a priori logique de l'admettre, nous avons constaté que la partie du sillage du protecteur influençant la mesure devenait plus important à mesure qu'on augmentait la distance entre l'orifice central du protecteur et le sommet de la sonde, à cause de l'intervention des orifices latéraux (entre les fils). C'est pourquoi nous avons adopté comme position définitive du protecteur celle avec la distance minimum (1 mm) assurant la protection de l'élément sensible.

La première étape des mesures au fil chaud avec le protecteur consistait à déterminer son influence sur la mesure de turbulence au point de vue de la perturbation de la réponse exacte de l'élément sensible au phénomène mesuré. Dans ce cadre, nous avons effectué les mesures de vitesses turbulentes, parallèlement, sans et avec le protecteur, dans l'eau pure, aux différents niveaux de la cuve. Les résultats sont présentés sur la figure III-2. On peut constater que les valeurs de u' , mesurées avec protecteur, sont toujours inférieures aux valeurs correspondantes mesurées sans protecteur, de l'ordre de grandeur de 5 %. Pour mieux éclaircir l'effet parasite du protecteur, on a fait l'analyse spectrale de deux signaux correspondante (sans et avec le protecteur) pour deux intensités de turbulence ($F_{GEN}$ = 6 et 2 hz).

Les courbes de densité spectrale (fig. III-3) montrent que toutes les valeurs f(n) , mesurées avec le protecteur, sont légèrement plus faibles que les

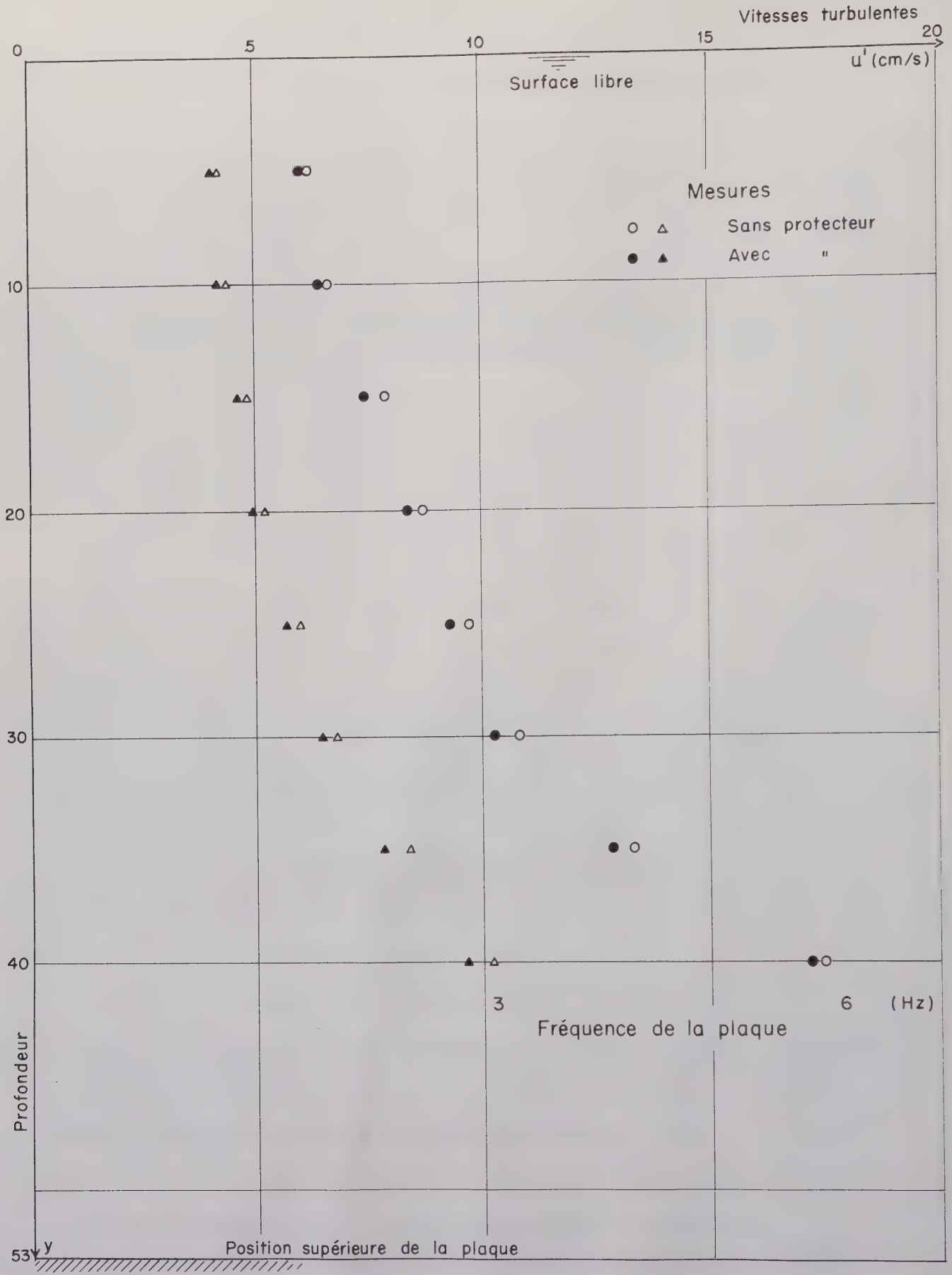



Fig. III - 2 – Influence du protecteur de la sonde à film chaud sur les mesures de vitesses turbulentes.

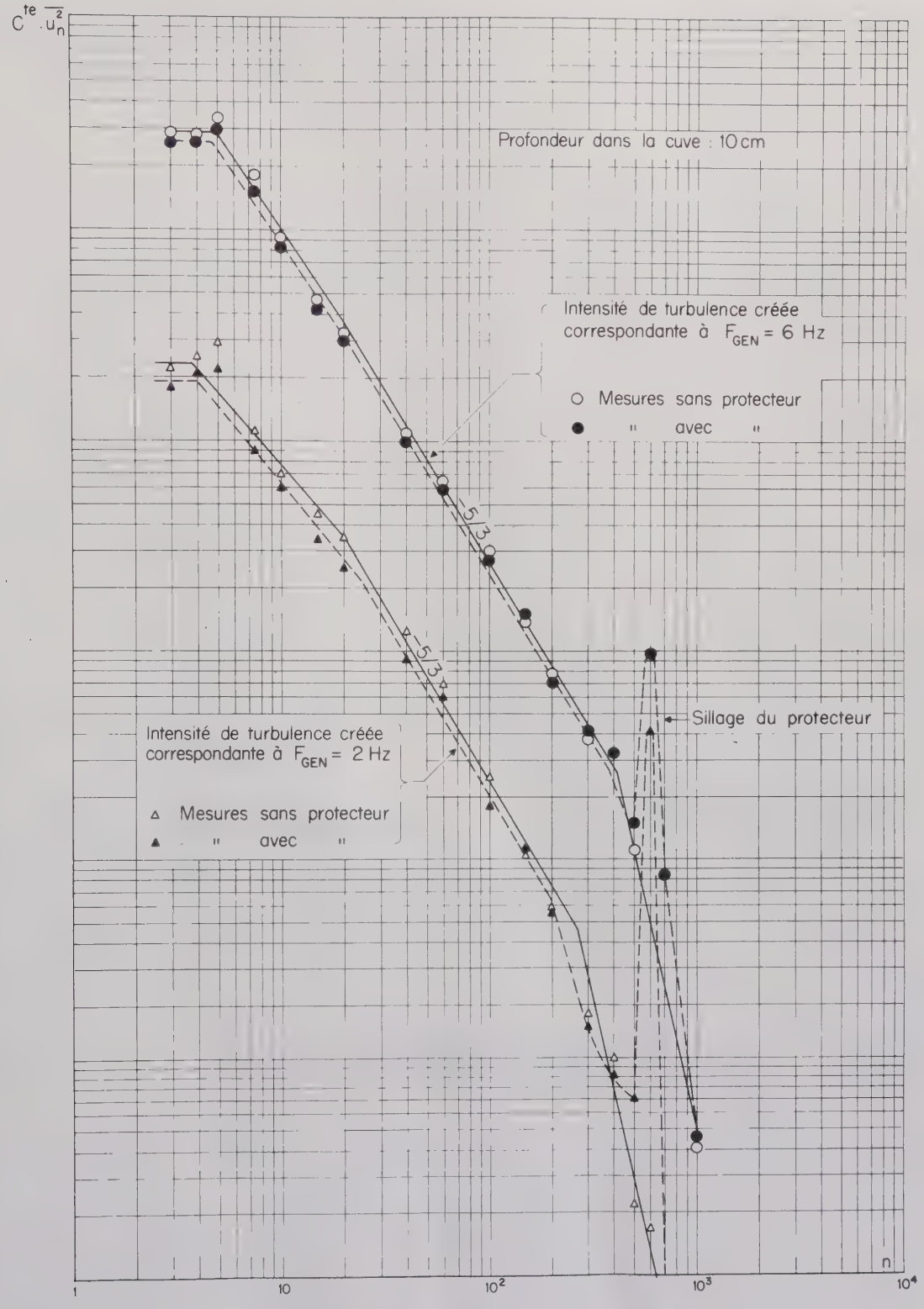



Fig. III - 3 - Spectres d'énergie

valeurs correspondantes sans protecteur, pour la gamme de fréquences inférieures à 450 hz environ. Pour la gamme spectrale supérieure à 450 hz, la situation est inverse - les valeurs f(n) sont un peu plus grandes avec le protecteur -

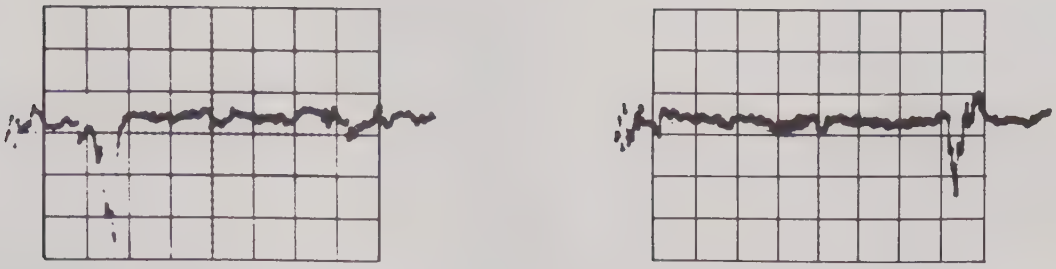
On peut expliquer la décroissance d'énergie correspondante à la gamme spectrale $n < 450$ hz par l'hypothèse suivante : Tous les tourbillons de taille plus grande que le diamètre d'orifice central du protecteur (3 mm) sont, d'une certaine manière, perturbés par le passage du protecteur, entraîné par le bras tournant. On peut admettre que ce phénomène comprend un transfert d'énergie de ces tourbillons aux tourbillons parasites et une perte d'énergie, liée à la formation des tourbillons parasites. C'est justement cette perte d'énergie qui explique la différence entre les valeurs de vitesses turbulentes, mesurées sans et avec protecteur.

A la fréquence 600 hz on voit le pic accentué dû à la création des tourbillons parasites. On peut remarquer en comparant les deux cas présentés sur la fig. III-3 que le pic parasite dû au protecteur est moins accentué si la turbulence est plus intense. Cela s'explique par le fait que la turbulence parasite dépend d'abord de la vitesse moyenne du déplacement de la sonde (correspondante à la vitesse de rotation du bras tournant). Cette vitesse étant constante dans tous les cas, la turbulence parasite est moins accentué si la turbulence à mesurer est plus forte et les valeurs de f(n) plus grandes.

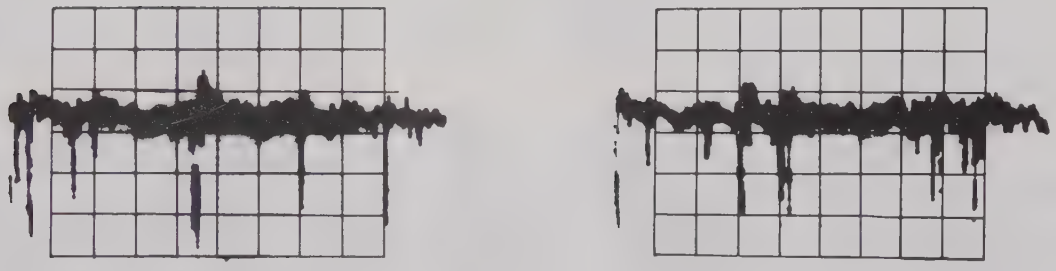
D'après les résultats expérimentaux exposés, on peut conclure que les mesures de turbulence au fil chaud avec protecteur sont très peu modifiées (d'ordre de grandeur de 5 %) par rapport aux mesures sans protecteur. Dans la deuxième étape des essais avec protecteur - mesures de turbulence en présence des particules solides en suspension - même cet écart de 5 % n'est plus en question, parce que, d'après le principe de mesure, on compare les valeurs correspondantes, dans l'eau pure et en présence de particules solides, toutes les deux mesurées avec protecteur, ce qui élimine formellement son effet parasite.

2.3 - Application du protecteur en présence de particules solides en suspension - phénomène de bouchage du protecteur par les billes -

Le protecteur de la sonde à film chaud était conçu en vue de permettre les mesures de la turbulence en présence des particules solides. Mais dès le premier essai nous avons remarqué un phénomène intéressant - observant le signal turbulent sur oscilloscope, on pouvait distinguer de temps en temps les pics - la tension baissait brusquement (fig. III-4). On s'est rendu compte que ce phénomène est dû aux heurts entre les billes et le protecteur. En fait, lorsque une bille, rencontrant le



Une division horizontale correspond à 0,02 sec.



Une division horizontale correspond à 0,20 sec.

FIG. III-4 VUE DES SIGNAUX TURBULENTS AVEC DES PICS PARASITES, DUS AU BOUCHAGE DU PROTECTEUR DE SONDE PAR LES BILLES EN SUSPENSION

protecteur, bouche son orifice, elle arrête à cet instant la circulation de l'eau. La vitesse du fluide relative à la sonde descend brusquement, provoquant par l'intermédiaire de l'élément sensible, moins refroidi, la baisse de tension du signal sorti d'anémomètre. Au point de vue de mesure de turbulence, ce phénomène posait un gros problème parce que la surface du signal intégré dans un intervalle de temps augmentait beaucoup à cause des grandes amplitudes des pics, et, par conséquent, la valeur quadratique moyenne lue sur le voltmètre intégrateur ne correspondait plus du tout à l'intensité réelle de la turbulence. Cependant, d'autre part, ce phénomène nous a donné l'idée d'essayer d'étudier la concentration des particules solides à partir de la fréquence des pics parasites.

En fait, il est tout à fait logique d'admettre que, plus la concentration de billes (ou "la densité de présence") est grande au niveau de mesure au fil chaud, plus la probabilité de rencontres entre protecteur et billes est élevée. Aussi, on pourrait dire que la fréquence des pics parasites représente un indice de la concentration des particules solides. Pour la réalisation des essais avec le protecteur de la sonde, il fallait mettre au point un dispositif électronique permettant de se débarasser des pics parasites au point de vue des mesures de turbulence, mais parallèlement, de profiter de leur existence au point de vue des mesures de concentration des particules solides. Ce dispositif a été réalisé dans le service électronique de notre laboratoire. En fait, on a utilisé "le simulateur" dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Le signal sortie d'anémomètre à fil chaud passe au travers d'un "seuil" réglable qui coupe toutes les amplitudes supérieures à un certain niveau. Ce seuil peut être réglé de façon qu'il coupe tous les pics parasites sans toucher le signal propre turbulent, ce qui devrait permettre l'interprétation correcte du signal turbulent à l'aide du voltmètre-intégrateur. En même temps, le simulateur enregistre les "largeurs" des pics coupés au niveau du seuil - c'est-à-dire la durée d'un pic, correspondante à la durée du bouchage de l'orifice du protecteur par une bille coincée.

## 3 - MESURES DE TURBULENCE PAR LA METHODE DU FIL CHAUD AVEC PROTECTEUR, EN PRESENCE DE PARTICULES SOLIDES EN SUSPENSION.

### 3.1 - Limitation des mesures au cas de faible concentration de particules solides.

Nous avons espéré que le dispositif électronique, décrit ci-dessus, pourrait résoudre le problème de pics parasites dans le signal turbulent et permettrait l'interprétation correcte de celui-ci à l'aide du voltmètre-intégrateur. Cependant,

nous avons constaté expérimentalement que ce dispositif peut accomplir sa fonction ainsi définie, seulement dans le cas de concentration relativement faible des particules solides. Dans le cas de forte concentration, la coupure de pics parasites n'était pas suffisante pour isoler le signal propre turbulent et assurer l'interprétation correcte de mesures des valeurs efficaces au voltmètre-intégrateur. Nos mesures de turbulence ont été donc limitée au cas de faible concentration de particules solides en suspension dans le plan de rotation du bras tournant.

Suivant notre conception de mesures, exposée au paragraphe 1, en variant l'intensité de turbulence créée dans la cuve, dépendant de la fréquence du mouvement de la plaque, on peut étudier, avec une seule sorte de billes, les différents cas de concentration de particules solides dans la cuve. Si la vitesse fluctuante au fond de la cuve est proche de la vitesse de chute de billes, celles-ci seront concentrées pratiquement en totalité dans la partie inférieure de la cuve, tandis que dans la partie supérieure leur concentration sera très faible. Ainsi, nous revenons au cas auquel nos mesures de turbulences sont limitées - il fallait donc mesurer la turbulence, en présence de particules solides en suspension, dans la partie supérieure de la cuve, l'intensité de turbulence créée satisfaisant la condition ci-dessus ($u'_f \simeq W$) Avec les billes, utilisées dans notre étude expérimentale ( $\rho_s$ = 1,10, d = 5 mm) cette condition est satisfaite pour les intensités de turbulence créée correspondantes à la fréquence de la plaque $F_{GEN}$ = 2 et 3 hz.

3.2 - Mesures des vitesses turbulentes.

Nous avons procédé aux mesures des vitesses turbulentes, par la méthode du fil chaud avec le protecteur de la sonde, pour deux intensités de turbulence créée ($F_{GEN}$ = 2 et 3 hz). Les mesures ont été effectuées dans la partie supérieure de la cuve, aux 4 niveaux différents, correspondants aux profondeurs de l'eau 5, 10, 15 et 20 cm. Nous avons varié la concentration totale de billes dans la cuve (la quantité totale de billes) afin d'étudier l'effet de la concentration sur la modification de la turbulence. Dans ce but, la quantité totale disponible de billes (200.000 billes) a été divisée en six unités de mesure, déterminées par volume. L'unité de mesure (le volume unitaire) consistait donc en 33.000 billes, ce qui représente 0,6 % de concentration totale moyenne ($C_{TOT}$) dans la cuve.

Les résultats de mesures des vitesses turbulentes sont présentés sur les figures III-5, 6 et 7 sous la forme de courbes u'(y) parallèlement avec la courbe correspondante $u'_o(y)$ pour l'eau pure.

Pour mieux mettre en évidence l'effet de la concentration de particules

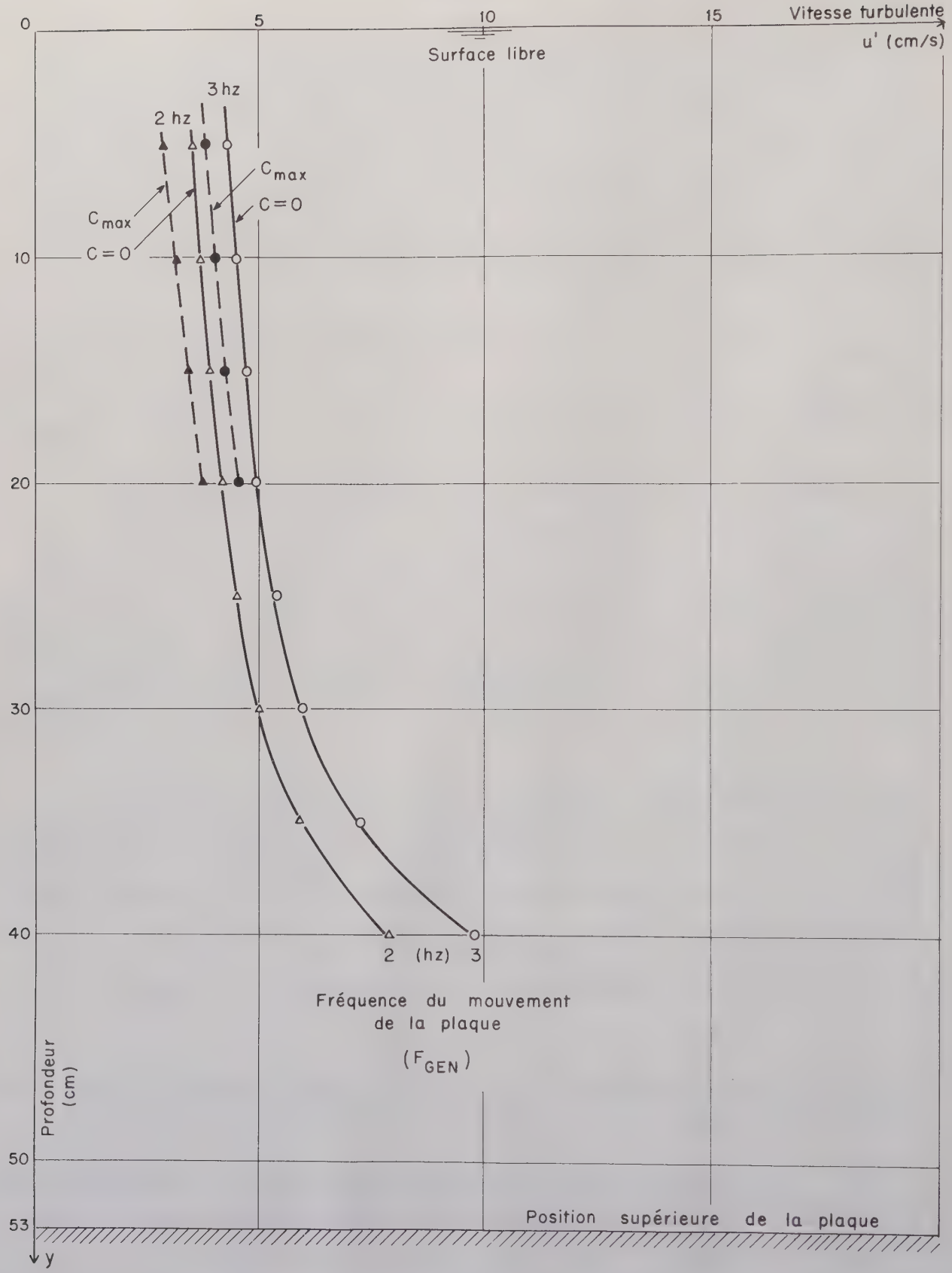



Fig. III-5 – Réduction des vitesses turbulentes sous l'influence de particules solides en suspension.

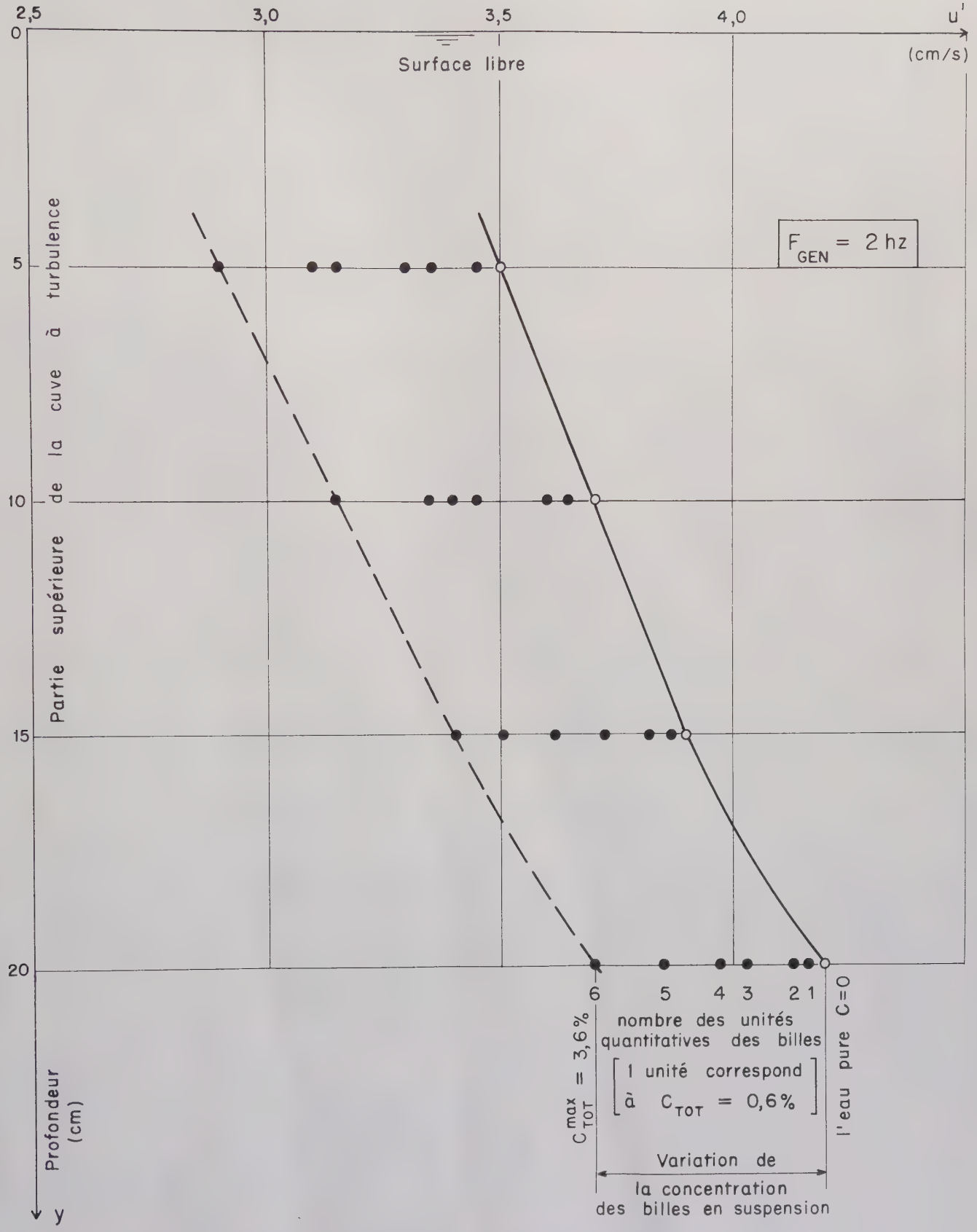



Fig. III - 6 - Réduction des vitesses turbulentes sous l'influence des particules solides en suspension.

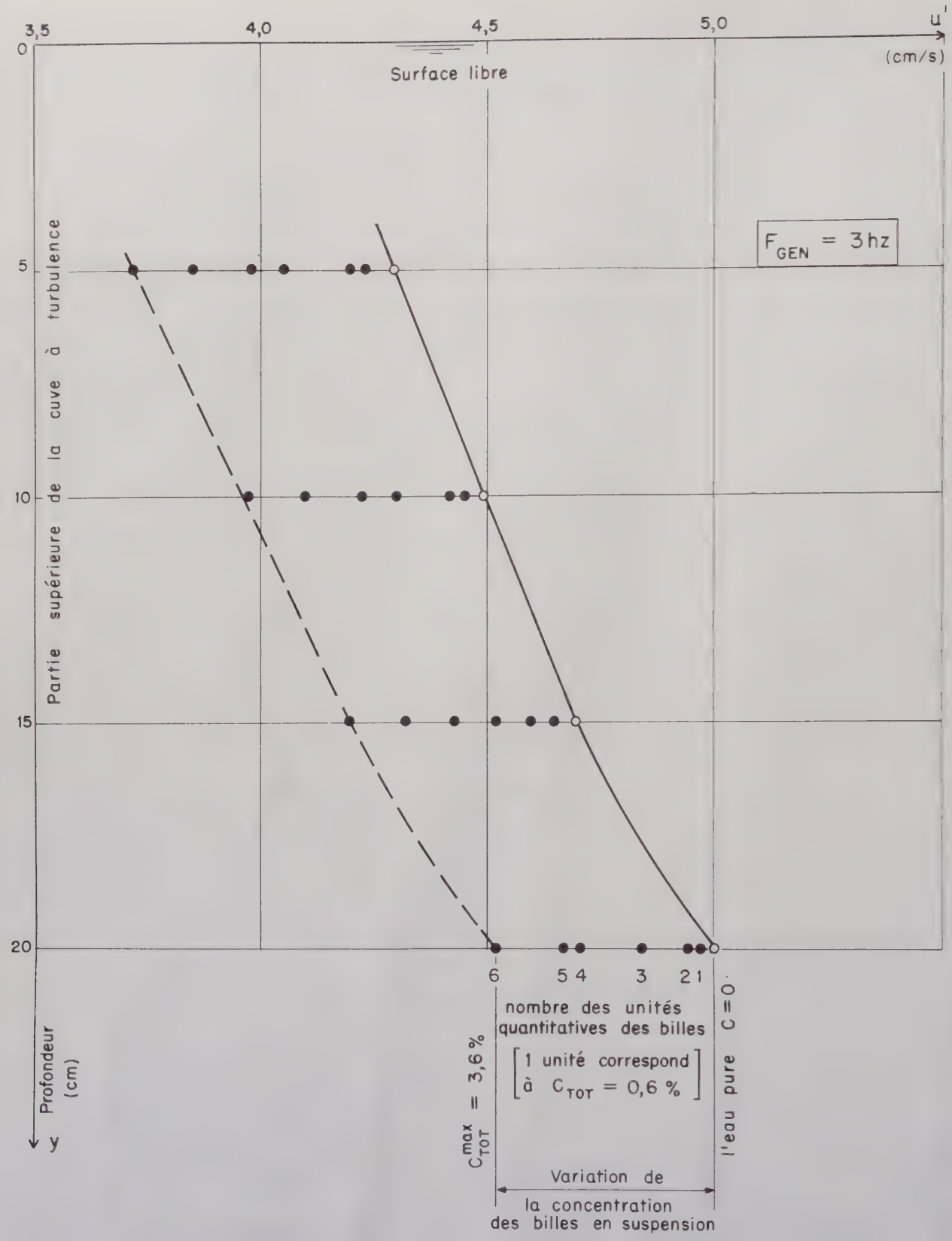



Fig. III-7 - Réduction des vitesses turbulentes sous l'influence de particules solides en suspension.

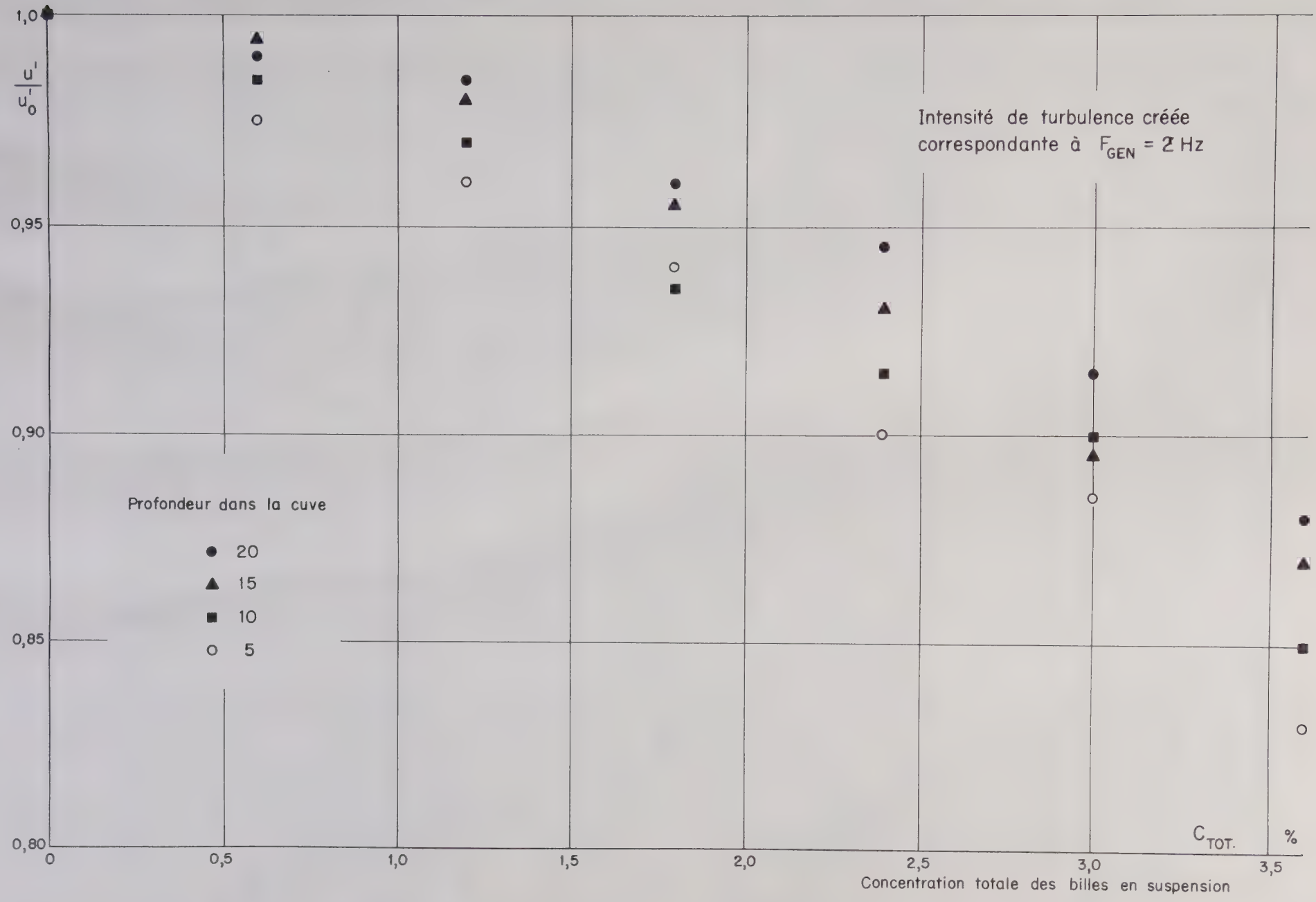



Fig. III - 8 – Réduction de turbulence par rapport à l'eau pure en présence des particules solides en suspension.

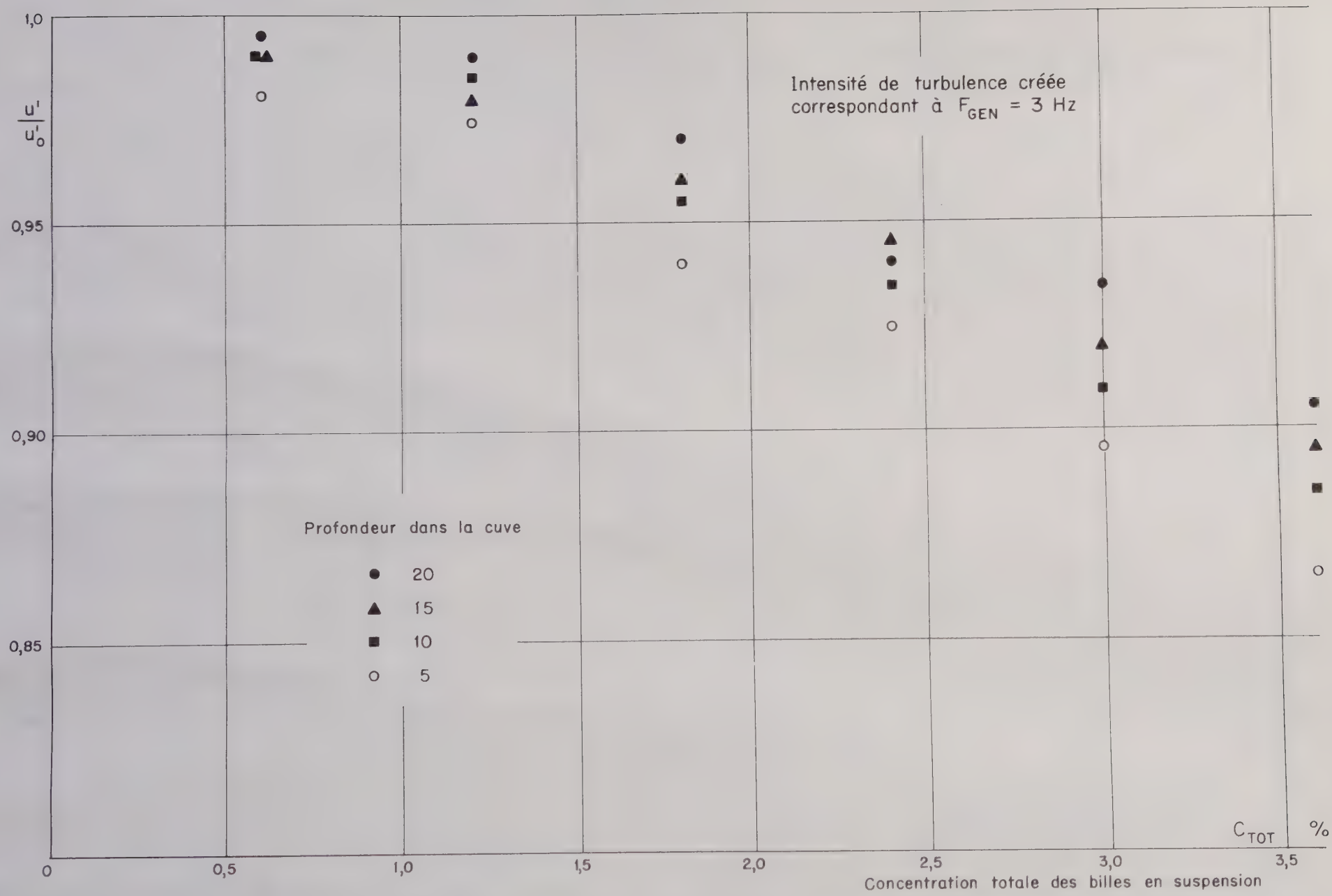



Fig. III - 9 — Réduction de turbulence par rapport à l'eau pure en présence des particules solides en suspension.

solides sur la réduction de la turbulence, nous avons présenté les mêmes résultats en forme $\frac{u'_c}{u'_o} = f(C_{TOT})$ sur les figures III-8 et 9.

La conclusion essentielle sur ces mesures est que la vitesse turbulente (et, par conséquent, l'énergie turbulente) diminue en présence des particules solides en suspension, à mesure que leur concentration totale augmente. La réduction de la vitesse turbulente, pour la concentration maximum disponible ($C_{TOT}$ = 3,6 %), par rapport à celle dans l'eau pure, est à peu près 15 % pour la turbulence plus faible ($F_{GEN}$ = 2 hz) et à peu près 10 % pour $F_{GEN}$ = 3 hz.

3.3 - Analyse spectrale.

Le procédé expérimental d'analyse spectrale d'un signal turbulent est exposé au chapitre II.

Pour les raisons expliquées dans le paragraphe précédent, nous avons effectué l'analyse spectrale des signaux turbulents, en présence de billes en suspension, enregistrés dans la partie supérieure de la cuve pour les cas des faibles intensités de turbulence créée ($F_{GEN}$ = 2 et 3 hz). Sur les figures III-10, 11 et 12 sont représentées des courbes de densité spectrale, parallèlement pour l'eau pure et en présence des particules solides en suspension. Il faut remarquer que nous avons enregistré un signal en utilisant la sonde sans protecteur (fig. III-10). Bien que, à ce niveau là (profondeur : 10 cm) et pour la faible intensité de turbulence créée ($F_{GEN}$ = 2 hz) la concentration moyenne de billes dans la partie supérieure de la cuve, soit pratiquement nulle, à cause du caractère aléatoire du mouvement de billes, quelques unes parmi celles-ci montent de temps en temps vers la surface libre, et, par conséquent, elles peuvent heurter la sonde à film chaud en mouvement dans le plan de rotation du bras tournant.

Nous avons néanmoins pris le risque de casser la sonde pour avoir un résultat plus net et pur, étant donné le caractère délicat et l'importance du phénomène étudié : la modification de spectre d'énergie. On peut constater que les résultats de mesures sans et avec le protecteur (figures III-10 et 11) sont pratiquement identiques, le pic parasite dû au sillage du protecteur mis à part. C'est encore une preuve que notre protecteur de la sonde a bien accompli sa fonction - protéger la sonde et ne pas perturber les mesures au fil chaud.

Les courbes comparatives de densité spectrale sur les figures III-10,11 et 12 montrent une assez nette modification des spectres en présence des billes en suspension par rapport à ceux dans l'eau pure. L'énergie correspondant aux basses fréquences

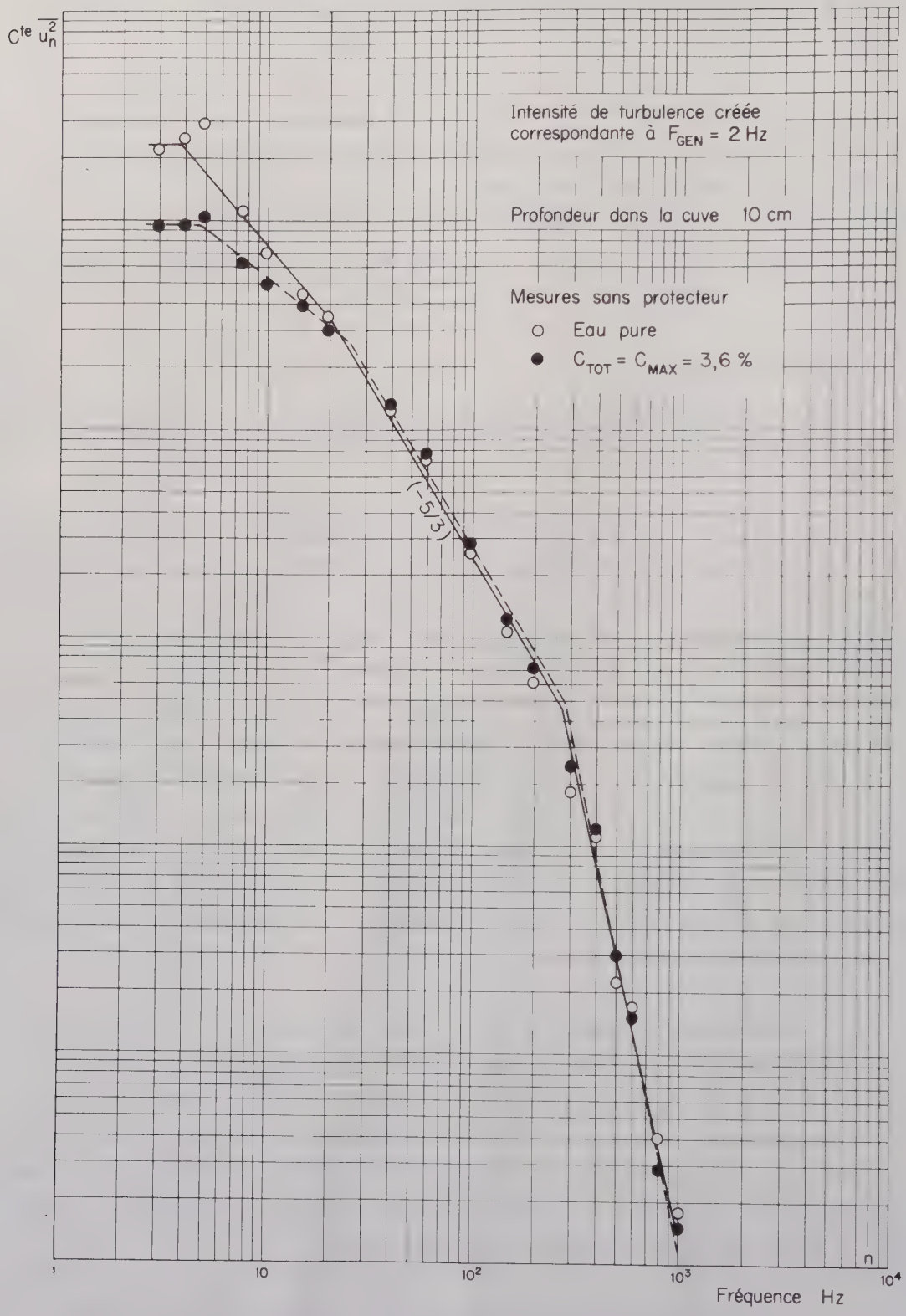



Fig. III-10 – Modification de spectre d'énergie en présence des particules solides en suspension.

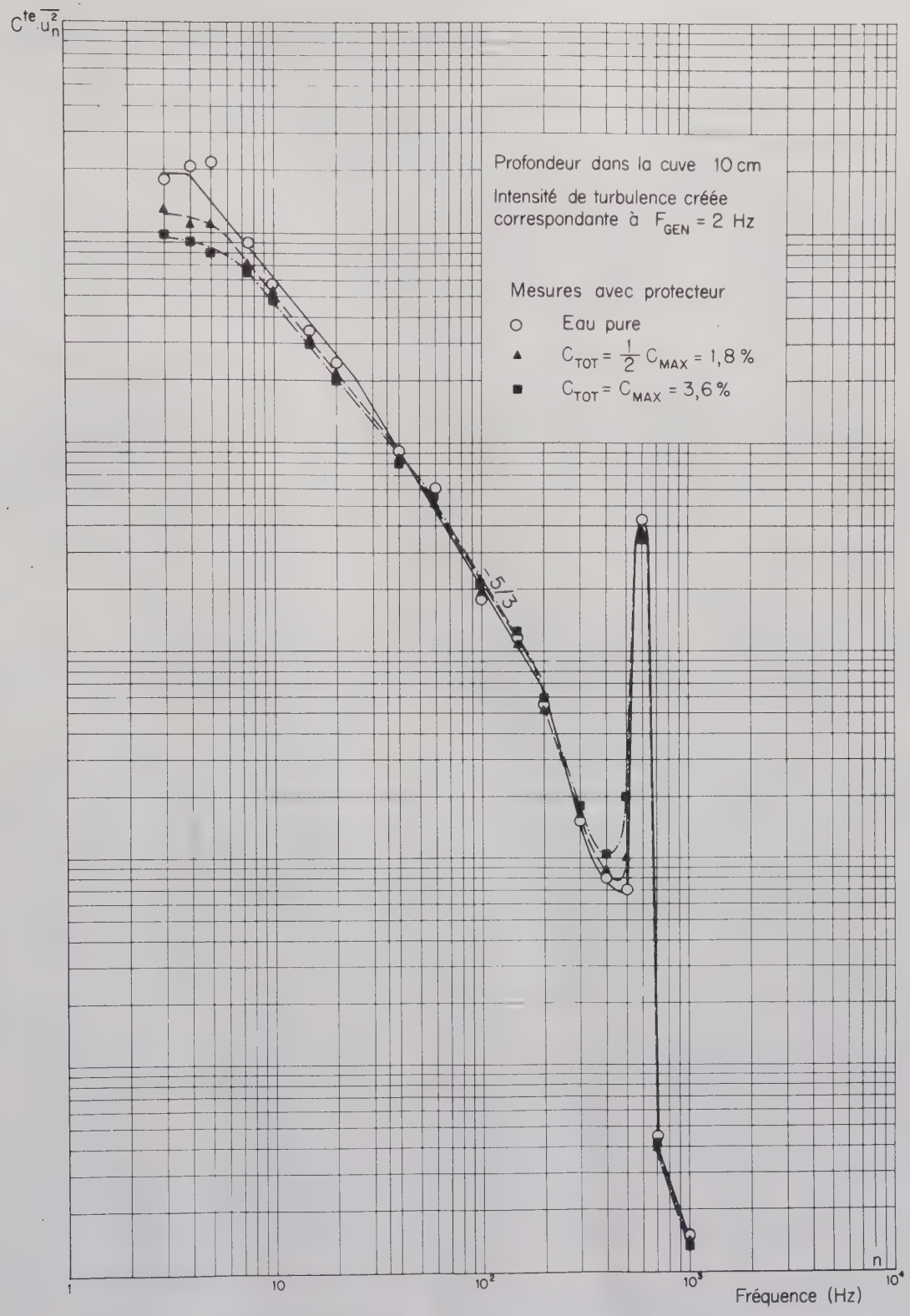



Fig. III - 11 - Modification de spectre d'énergie en présence des particules solides en suspension.

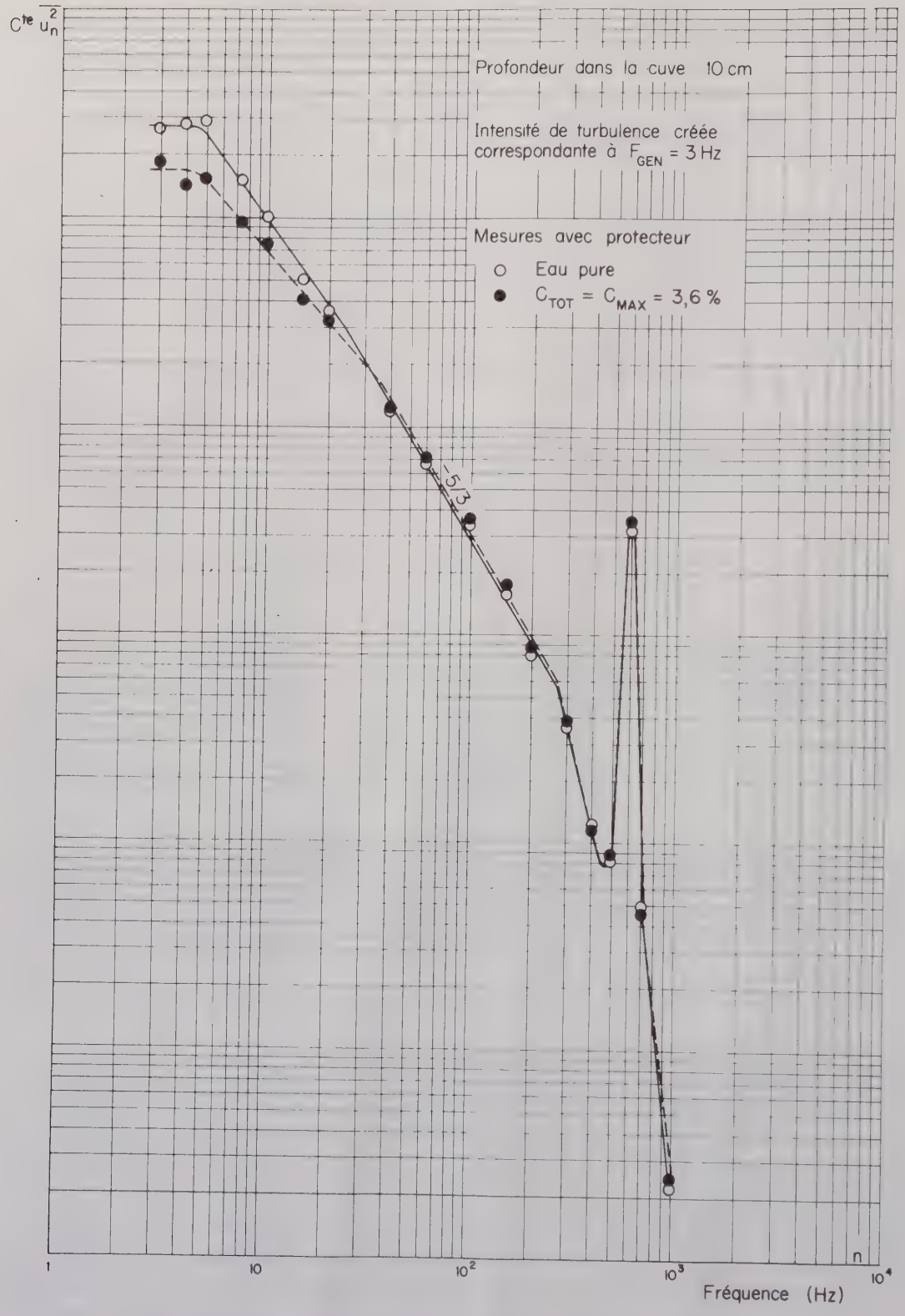



Fig. III-12 – Modification de spectre d'énergie en présence des particules solides en suspension.

est diminuée, tandis que l'énergie correspondant aux fréquences plus élevées (notamment dans la zone d'inertie) est plus grande que dans le cas de l'eau pure.

En total, on trouve une nette réduction de l'énergie turbulente par rapport à l'eau pure (entre 20 % et 30 %), ce qui correspond à une réduction des vitesses turbulentes entre 10 % et 15 %. (On peut remarquer que ces valeurs calculées de deux façons différentes - une fois à partir de lecture à voltmètre-intégrateur, une autre fois à partir de surfaces intégrées des courbes spectrales - étant les mêmes dans les deux cas, sont déterminées avec une bonne précision).

3.4 - Echelles turbulentes.

Pour une turbulence homogène et isotrope, on peut calculer, à partir de spectres unidimensionnels f(n) les échelles turbulentes, données par les expressions suivantes :

- La microéchelle

$$\lambda = \frac{V}{2\pi} \left[ \frac{\int_0^\infty f(n)\, dn}{\int_0^\infty n^2 f(n)\, dn} \right]^{1/2} \qquad \text{(III-1)}$$

- L'échelle intégrale

$$L = \frac{V}{4} \frac{f(o)}{\int_0^\infty f(n)\, dn} \qquad \text{(III-2)}$$

(V désigne la vitesse moyenne relative entre l'élément sensible et le fluide).

Comme la modification de spectres, sous l'influence de particules solides en suspension, est significative, les échelles turbulentes sont, par conséquent, modifiées par rapport à l'eau pure.

Après avoir effectué le calcul suivant les relations (III-1) et (III-2), nous avons constaté que :

- La microéchelle en présence de particules solides en suspension est réduite par rapport à celle de l'eau pure à peu près de 15 % ($F_{GEN}$ = 3 hz - 13 %, $F_{GEN}$ = 2 hz - 16 %).

- L'échelle intégrale est réduite entre 20 % ($F_{GEN}$ = 3 hz) et 35 % ($F_{GEN}$ = 2 hz).

3.5 - Interprétation des résultats expérimentaux.

Notre étude expérimentale du phénomène de la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension, par la méthode du fil chaud avec protecteur, a un caractère spécifique, dû à la conception des mesures. Cette conception a résulté, comme nous avons indiqué, de la limitation du système de mesure au cas de faible concentration de billes et des caractéristiques de notre installation expérimentale.

Comme nous avons vu au paragraphe précédent, les résultats expérimentaux montrent une nette modification des caractéristiques de turbulence - vitesses fluctuantes, spectres, échelles - sous l'influence de particules solides. La diffusion d'énergie turbulente, provenant du fond de la cuve, est donc profondément marquée par la présence des particules solides en suspension.

Le mécanisme de l'influence de particules solides sur la turbulence est trop complexe pour qu'on puisse donner une interprétation précise et une analyse théorique des résultats expérimentaux.

Nous pouvons, d'abord, essayer de situer notre cas expérimental dans le cadre des caractéristiques de suspension de particules solides dans un écoulement turbulent, exposés à la fin du chapitre I. Suivant les critères définis à ce chapitre là et compte tenu des caractéristiques de turbulence, créée dans la cuve et des billes utilisées dans nos essais, nous pouvons constater :

- La densité des billes (1,10) étant supérieure à celle de l'eau, il se produit une transformation de l'énergie cinétique du fluide en énergie potentielle de particules solides, due au travail de la mise en suspension des billes, effectué par la turbulence.

- Le rapport entre le diamètre des billes (5 mm) et l'échelle de Kolmogoroff de la turbulence dans la cuve ( $\eta$ = 0,05 mm - $F_{GEN}$ = 6 hz , $\eta$ = 0,10 mm $F_{GEN}$ = 2 hz ) est très supérieure à 1 . Par conséquent, dans notre cas, une particule solide ne peut point être assimilée à une particule fluide. Puisque l'effet d'inertie et "crossing-trajectories effect" sont importants, les billes ne suivent pas parfaitement le mouvement du fluide, mais elles sont en mouvement relatif par rapport au fluide. Les conséquences directes de ce mouvement relatif sont la dissipation supplémentaire d'énergie turbulente, due à la résistance du fluide et la création de la turbulence parasite.

- Bien que la concentration totale maximum des billes en moyenne soit relativement faible (3,60 %), dans les cas étudiés, suivant notre conception des mesures ($F_{GEN}$ = 2 hz et 3 hz), la grande majorité des billes étant concentrée dans la partie inférieure de la cuve ("la zone de suspension"), la concentration dans cette zone est considérable (à peu près entre 10 % et 15 %).

En conséquence, l'effet de la réduction de l'espace effectif du fluide et l'effet de la modification de la viscosité du mélange fluide-particules solides par rapport au fluide pur, peuvent être significatifs.

Simultanément, à cause de la grandeur des billes et de la forte concentration dans la zone de suspension au fond de la cuve, il se produit sans doute une transformation des gros tourbillons en plus petits.

En résumé, on peut admettre que tous les aspects de l'influence des particules solides sur la turbulence sont, dans notre cas, significatifs. Nous allons essayer de vérifier ce raisonnement, qui est basé sur le schéma théorique de l'influence de particules solides sur la turbulence de l'écoulement porteur (chapitre I), par les résultats expérimentaux de notre étude.

La modification des caractéristiques de la turbulence, que nous avons constaté expérimentalement, résulte de l'effet global des particules solides. Par conséquent, il est difficile de distinguer les divers aspects de l'influence des billes sur la turbulence et déterminer, à partir des résultats expérimentaux, les effets particuliers mentionnés. Nous pouvons pourtant procéder à une tentative de l'interprétation des résultats de mesure de spectres turbulents, afin de déceler dans les modifications de ceux-ci sous l'influence de particules solides en suspension quelques effets particuliers des billes sur la turbulence. Ainsi nous pouvons vérifier nos hypothèses exposées sur l'existence de ces effets et constater quelles structures turbulentes sont les plus influencées par ceux-ci.

En observant la figure III-10 on constate que la différence entre la courbe spectrale en présence des billes en suspension et celle de l'eau pure est le plus accentué dans la gamme des faibles fréquences, correspondantes aux gros tourbillons. On peut admettre que cette réduction de l'énergie turbulente correspondant aux gros tourbillons, sous l'influence des particules solides en suspension, résulte :

- d'une perte d'énergie du fluide transformée en énergie potentielle des billes, par le travail de mise en suspension, et
- d'un transfert d'énergie de cette zone vers les fréquences plus élevées, dû à la transformation de gros tourbillons en plus petits.

En ce qui concerne la zone des fréquences élevées - les petits tourbillons - nous pouvons admettre que l'augmentation d'énergie correspondant à ces tourbillons (notamment dans la zone d'inertie) résulte :

- de l'apport d'énergie des gros tourbillons qui se transforment en plus petits ;
- de la superposition de l'énergie de turbulence propre, créée dans la cuve et la turbulence parasite, due au mouvement relatif des billes par rapport au fluide.

Ainsi, effectivement, on peut expliquer la modification de la courbe de densité spectrale en présence de particules solides en suspension, par rapport à celles de l'eau pure, par quelques effets particuliers de billes sur la turbulence.

La diffusion d'énergie turbulente, provenant du générateur de la turbulence, à travers la zone de suspension des particules solides, est donc marquée, suivant notre hypothèse, par un transfert d'énergie de gros tourbillons vers les tourbillons plus petits. Cependant, nous ne pouvons prétendre ni décrire précisément le mécanisme de ce transfert à partir des résultats expérimentaux de notre étude, ni donner une explication théorique de ce phénomène. On peut supposer, pourtant, que le mouvement de tourbillons et le processus de cascade sont influencés, d'une certaine manière, par la présence des particules solides en suspension. En effet, nous avons vu que, dans notre cas expérimental, les billes ne peuvent pas être assimilées aux particules fluides et, par conséquent, elles suivent le mouvement du fluide avec un certain glissement. Celui-ci est la cause de la dissipation supplémentaire de l'énergie turbulente et de la création des tourbillons parasites de taille inférieure au diamètre des billes, lesquels peuvent interférer avec les tourbillons de même taille de la turbulence propre.

Il faut souligner que, d'après nos résultats expérimentaux, la courbe de densité spectrale est la plus modifiée, par rapport à l'eau pure, dans la gamme de basses fréquences. C'est-à-dire, ce sont les gros tourbillons qui sont les plus influencés par la présence de particules solides en suspension. C'est une constatation très importante, compte tenu de ce que les différents auteurs ont des opinions contradictoires sur le caractère de la modification de spectre d'énergie turbulente sous l'influence de particules solides en suspension. Par exemple, SOO [26] admet que le spectre turbulent devrait être modifié en présence de particules solides notamment dans la zone de grands nombres d'onde, puisque la différence entre les vitesses du fluide et de particules solides augmente avec le nombre d'onde de la turbulence.

Ce qu'on peut objecter à l'idée de SOO, c'est qu'il ne tient pas compte des différents types possibles de suspension au point de vue de comportement de particules solides dans un écoulement turbulent. Nous avons vu, en effet, au chapitre I, qu'il faut tenir compte de la possibilité de réponse de particules solides aux fluctuations turbulentes. Il est logique d'admettre que la présence de particules solides en suspension ne peut pas influencer ces tourbillons dont les fréquences dépassent la possibilité de réponse dynamique de particules. Autrement dit, si le temps caractéristique de petits tourbillons est inférieur à la constante de temps de particules on pourrait admettre que le mouvement de ces tourbillons est indépendant du mouvement de particules solides. En fait, les particules solides peuvent être considérées comme

pratiquement immobiles par rapport au mouvement de ces tourbillons. Il ne faut pas cependant oublier l'aspect spatial de ce phénomène : la présence de particules solides en suspension réduit l'espace effectif occupé par le fluide. Nous pensons pourtant que les structures les plus fines de turbulence ne seront ainsi influencées que dans le cas de très forte concentration de particules solides.

Nous allons procéder à une évaluation du rapport entre la constante de temps de particules solides et le temps caractéristique des plus petits tourbillons, dans notre cas expérimental, afin de clarifier cette question.

Nous pouvons calculer la constante de temps de particules suivant la formule valable pour le régime de Stokes, en considérant, avec toute réserve, la valeur obtenue, comme l'indice de la possibilité de réponse de particules aux fluctuations turbulentes. Nous avons donc :

$$\tau = \frac{\rho_s d^2}{18\mu} = \frac{d^2}{18\nu} \frac{\rho_s}{\rho_f} = \frac{0{,}5^2}{18 \cdot 0{,}01} 1{,}10 = 1{,}52 \text{ sec.}$$

D'autre part, si l'on admet que les plus petits tourbillons sont caractérisés par l'échelle de dissipation, on obtient :

$$t_d = \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} = \frac{1}{\sqrt{15}} \frac{\lambda}{u'}$$

(compte tenu de ce que $\epsilon = 15\nu \frac{u'^2}{\lambda^2}$ )

D'après nos résultats expérimentaux, dans la partie supérieure de la cuve pour la faible intensité de turbulence créée ($F_{GEN}$ = 2 hz), nous avons :

$$\lambda \approx 4 \text{ mm} \qquad\qquad u' \approx 3{,}5 \text{ cm/sec.}$$

ce qui donne :

$$t_d \approx \frac{1}{4} \frac{\lambda}{u'} = \frac{1}{4} \frac{0{,}4}{3{,}5} = 0{,}028 \text{ s}$$

Nous pouvons donc constater que la constante de temps de particules que nous avons utilisées est très supérieure au temps caractéristique des plus petits tourbillons (1,52 $\longleftrightarrow$ 0,028). Par conséquent, suivant notre hypothèse, le mouvement de ces tourbillons est indépendant du mouvement de particules solides en suspension - ceux-ci donc ne sont pratiquement pas influencés par la présence de particules solides.

Conformément à cette hypothèse, le spectre d'énergie turbulente ne devrait pas être modifié dans la zone de la dissipation visqueuse, correspondante aux plus petits tourbillons. On peut constater que nos résultats expérimentaux confirment cette

conclusion : les courbes de densité spectrale sur les figures III-10, 11 et 12 en présence de particules solides en suspension sont pratiquement confondues avec celles de l'eau pure dans la zone des petits tourbillons ( n > 400 hz ).

Cette conclusion est la plus nette sur la figure III-10, qui représente les mesures effectuées sans protecteur de sonde et, par conséquent, sans le sillage du protecteur qui, étant situé justement dans la zone considérée, pourrait rendre l'image moins claire.

Dans la zone d'inertie (entre 20 et 200 hz) la courbe de densité spectrale en présence de billes en suspension est légèrement au-dessus de celle correspondant à l'eau pure. Mais, suivant notre explication précédente, cette modification résulte de transfert d'énergie de la gamme spectrale de basses fréquences (< 20 hz) vers la zone d'inertie, par le mécanisme de la transformation de gros tourbillons en plus petits. Autrement dit, on peut admettre que les tourbillons de la zone d'inertie ne sont pas directement influencés par la présence de particules solides en suspension. Après la considération de la zone de la dissipation visqueuse et la zone d'inertie, on pourrait admettre la conclusion suivante :

Dans notre cas expérimental, déterminé par les caractéristiques de la turbulence créée et de billes utilisées, les particules solides en suspension n'influencent que les grosses structures turbulentes.

Essayons maintenant de clarifier cette question de point de vue de réponse dynamique de billes aux fluctuations correspondantes aux gros tourbillons. En effet, conformément à notre hypothèse, le temps caractéristique de ces tourbillons doit être de même ordre de grandeur que la constante de temps de billes. Rappelons d'ailleurs la conclusion de FIELD [13] , dont nous avons mentionné le travail au chapitre I : "On peut admettre que les particules solides influencent ces tourbillons qui ont l'échelle temporelle de même ordre de grandeur que la constante de temps de particules ("relaxation time").

Pour évaluer l'ordre de grandeur de temps caractéristique de gros tourbillons, nous admettons que ceux-ci sont caractérisés par l'échlle intégrale (L), et que leur vitesse caractéristique peut être rapprochée par la vitesse turbulente (u'). Leur temps caractéristique peut donc être évalué par :

$$T = \frac{L}{u'}$$

Les mesures de spectres, représentées sur les figures III-10, 11 et 12, sont effectuées dans la partie supérieure de la cuve à faible intensité de la turbulence créée ($F_{GEN}$ = 2 et 3 hz). Nous avons dans ce cas les valeurs suivantes :

$$L \approx 6 \text{ cm} \qquad u' \approx 3{,}5 \text{ cm/sec.}$$

$$T = \frac{L}{u'} = \frac{6}{3{,}5} = 1{,}70 \text{ sec.}$$

Nous pouvons donc constater que le temps caractéristique de gros tourbillons (T = 1,70 sec.) est de même ordre de grandeur que la constante de temps de particules solides ( $\tau$ = 1,50 sec.), ce qui cadre avec notre hypothèse.

## 4 - MESURES DE LA VARIATION DE LA CONCENTRATION DE PARTICULES SOLIDES A UN NIVEAU DONNE, EN FONCTION DE LA QUANTITE TOTALE DES BILLES EN SUSPENSION.

### 4.1 - Concentration limite de particules solides dans un écoulement turbulent.

Le problème de la suspension de particules solides dans un écoulement turbulent a quelques aspects de grande importance pratique. Parmi ceux-ci, il faut souligner notamment l'existence d'une capacité maximum de transport des matériaux solides en suspension dans un écoulement.

Il s'agit, en effet, d'un mécanisme très complexe de l'intéraction entre la suspension des particules solides et la turbulence de l'écoulement porteur. La répartition des particules solides, en suspension dans un milieu turbulent, dépend évidemment des caractéristiques de cette turbulence. On peut admettre logiquement que le rapport entre la vitesse turbulente u' (ou la composante verticale v' , si la turbulence n'est pas isotrope), et la vitesse de chute des particules solides w joue dans ce phénomène un rôle essentiel. Mais, parallèlement à l'action de turbulence pour répartir les particules solides, il faut tenir compte de leur réaction sur la turbulence elle-même. Cette réaction cause une certaine modification de la turbulence et, par conséquent, la répartition des particules solides change. On peut supposer que ce processus de l'intéraction entre les particules solides en suspension et la turbulence, dure jusqu'au moment de la stabilisation du phénomène : il existerait une concentration limite telle que la turbulence soit réduite à une valeur juste suffisante pour maintenir les matériaux en suspension.

En effet, c'est le rapport entre les forces liées aux réactions de particules solides sur la turbulence et les forces qui accompagnent le mouvement turbulent du fluide, qui change dans ce processus. Ces forces de réaction dépendent, évidemment, de la concentration de particules solides.

Supposons, à l'instant initial, une forte concentration de particules solides en suspension dans l'écoulement. La force de réaction peut être de l'ordre de grandeur des autres termes de l'équation dynamique du fluide, et la turbulence pourrait être réduite. Par conséquent, la capacité de suspension de l'écoulement sera réduite et à l'instant prochain la concentration de particules solides sera plus faible et la force de réaction aussi. C'est-à-dire, on peut admettre que le rapport entre la force de réaction et les forces "turbulentes" diminue dans le processus de la stabilisation.

Ainsi, on pourrait définir la concentration limite de particules solides en suspension dans l'écoulement, comme la concentration dont l'effet sur la turbulence, par rapport aux forces qui accompagnent le mouvement turbulent du fluide, est à la limite pour laquelle la turbulence n'est pas encore significativement affectée.

Nous avons fait quelques prises de vue de la suspension dans la cuve à turbulence afin de donner une idée sur le phénomène étudié. Les photographies sur les figures III-13 et 14 montrent quatre cas extrêmes, dans le cadre de notre étude expérimentale : une forte turbulence ($F_{GEN}$ = 6 hz) et une faible turbulence ($F_{GEN}$ = 2 hz), toutes les deux, une fois avec une concentration des billes en suspension très faible ($C_{TOT}$ = 0,2 %) et une autre fois, avec la concentration forte, correspondante à la quantité totale maximum disponible de billes ($C_{TOT}$ = 3,6 %).

On peut remarquer que dans le cas d'une forte turbulence (la figure III-13) la répartition de billes en suspension est qualitativement la même en deux cas - pour la faible et la forte concentration totale (la quantité totale) des billes dans la cuve. C'est-à-dire, la courbe de la concentration relative en fonction de la profondeur est pratiquement la même dans les deux cas.

D'après notre analyse qualitative de ce phénomène, cela signifie que la turbulence n'est pas affectée par la réaction des particules solides, cette réaction étant très faible dans le cadre d'une intensité turbulente élevée. Autrement dit, la concentration totale maximum est au-dessous de concentration limite pour cette turbulence.

Cependant, le cas de faible turbulence (fig. III-14) est tout à fait différent. On voit que la concentration relative des billes en suspension n'est pas du tout la même pour une faible et une forte concentration totale. Dans le premier cas les particules solides sont réparties presque dans tout volume d'eau dans la cuve, tandis que, dans le deuxième cas, toutes les billes sont concentrées au fond de la cuve. On peut conclure que la concentration correspondante à la quantité maximum

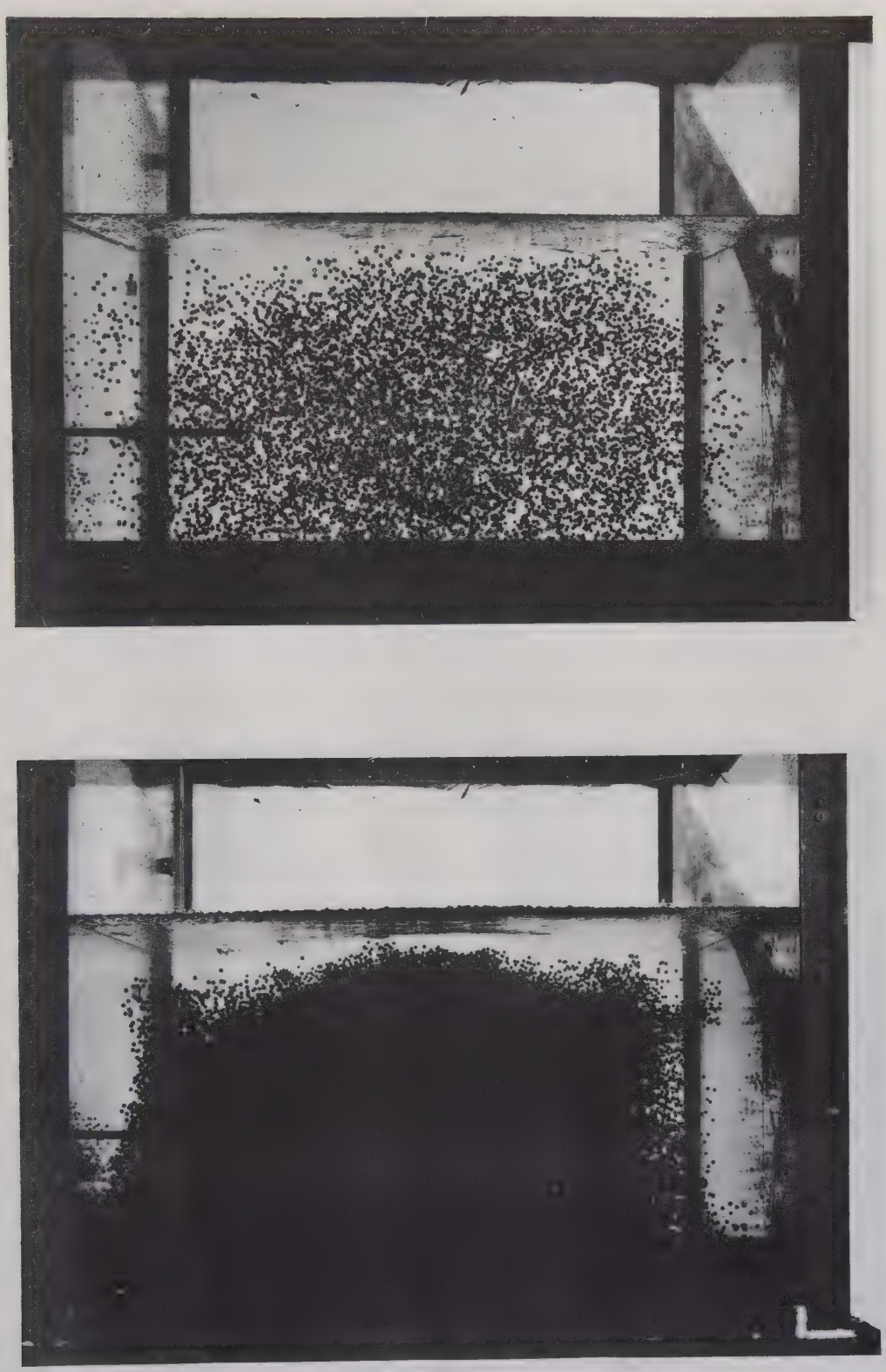


FIG. III-13 - VUE DE LA SUSPENSION DANS LA CUVE DANS LES CAS DE FAIBLE ET FORTE CONCENTRATION DES BILLES (INTENSITE DE TURBULENCE CREEE CORRESPONDANTE A $F_{GEN}$ = 6 hz)

FIG. III-14 - VUE DE LA SUSPENSION DANS LA CUVE DANS LES CAS DE FAIBLE ET FORTE CONCENTRATION DES BILLES (INTENSITE DE TURBULENCE CREEE CORRESPONDANTE A $F_{GEN}$ = 2 hz)

disponible de billes dans la cuve ($C_{TOT}$ = 3,6 %) est au-dessus de la concentration limite pour cette faible turbulence.

4.2 - Procédé expérimental.

Comme nous avons indiqué au paragraphe 2.3, le phénomène parasite, dû à l'application du protecteur de sonde en présence de particules solides en suspension nous a donné l'idée d'essayer d'étudier la concentration de particules solides à partir de la fréquence des pics parasites. Nous admettons l'hypothèse suivant laquelle il existe une relation entre cette fréquence et la concentration des particules solides au niveau de mesure (dans le plan de rotation du protecteur au bout du bras tournant), basée sur la probabilité des heurts des billes et du protecteur. (L'existence de cette relation est confirmée par le fait que le rapport entre le nombre de heurts et la concentration moyenne est à peu près constant là où il doit l'être, c'est-à-dire, comme nous le verrons, quand la turbulence est très forte).

Nous avons décrit au paragraphe 2.3 le dispositif électronique, avec le seuil de la coupure des pics parasites. Ce dispositif enregistre les durées des pics ($\Delta$ t) au niveau du seuil. Pour une base de temps d'intégration (T), on mesure, à l'aide de voltmètre-intégrateur, $T' = T - \Sigma\Delta t$ , $\Sigma\Delta t$ représente la durée totale de tous les pics dans cet intervalle. Comme la forme des pics peut être considérée comme statistiquement homogène - en tout cas indépendant de la concentration - $\Delta$ t est en moyenne constant, et, ainsi, $\Sigma\Delta t$ correspond au nombre de pics dans l'intervalle de temps (T).

Conformément à l'hypothèse admise ci-dessus, on peut considérer le rapport $I = \frac{\Sigma\Delta t}{T}$ comme l'indice de concentration de billes à un niveau donné. Puisque la concentration, à un niveau donné, dépend aussi de la quantité totale des billes en suspension (exprimée par le nombre (N) des unités volumétriques des billes, variant entre 1 et 6, la quantité maximum à disposition pour nos mesures étant divisée à 6 unités), on considère le rapport $\frac{I_N}{N}$ comme l'indice de concentration relative (le rapport entre la concentration mesurée à un niveau, à la quantité totale des billes en suspension) des particules solides à un niveau donné. Afin de déterminer la fonction $\frac{I_N}{N} = f(N)$ pour les différents cas de l'intensité turbulente, et de la concentration des billes, on a procédé aux mesures aux quatre niveaux de la cuve (10, 20, 30 et 40 cm) de profondeur et pour cinq intensités de turbulence (correspondantes à $F_{GEN}$ 2, 3, 4, 5 et 6 hz).

Le procédé de mesure était le suivant : A un niveau donné dans la cuve, pour une intensité donnée de turbulence, créée dans la cuve, il fallait ajuster

d'abord le seuil de coupure de dispositif électronique. Le principe essentiel d'application de ce dispositif consistait à éliminer les pics parasites sans modifier le signal propre turbulent. Compte tenu de cela, nous avons fait le réglage du seuil avec le signal turbulent de l'eau pure, sans pics parasites, de telle façon que le seuil se situait juste au-dessous du signal sans le toucher (T' = T). On pourrait vérifier que cette coupure ne perturbait pas le signal enregistré en faisant la lecture avant et après son intervention. Ensuite, nous avons ajouté les billes, par unité de mesure. La lecture au voltmètre-intégrateur donnait $T' = T - \Sigma\Delta t$.

4.3 - Interprétation des résultats de mesures.

Les résultats de mesures de la variation de la concentration de particules solides en suspension, sont présentés en forme de courbes comparatives $\frac{I_N}{N} = f(N)$ *), correspondantes aux différents niveaux dans la cuve (les profondeurs 10, 20, 30 et 40 cm), pour l'intensité de turbulence, créée dans la cuve (définie par la fréquence du mouvement de la plaque - $F_{GEN}$), donnée comme paramètre. Les résultats sont présentés sur les figures III-15, 16, 17, 18 et 19.

Avant de commenter les résultats, il faut rappeler la signification des courbes $\frac{I_N / N}{I_N = 1} = f(N)$ :

- Si les points expérimentaux sont rassemblés (avec une dispersion évidemment fonction de la précision des mesures) autour d'une droite horizontale, cela signifie que la concentration relative ne change pas en fonction de la quantité totale de billes dans la cuve (c'est-à-dire, à la quantité totale de billes x correspond la concentration de billes à niveau observé y , à 2x correspond 2y , 3x → 3y etc...). Suivant notre analyse qualitative du phénomène de la concentration limite de particules solides en suspension, exposée au paragraphe 4.1, le fait que la concentration relative ne change pas signifie que la concentration limite, pour l'intensité de turbulence à niveau observé, n'est pas encore atteinte.

- Si les points expérimentaux montrent que le rapport $\frac{I_N}{N}$ diminue en fonction de N , cela signifie que la concentration limite pour ce cas est dépassée et, par conséquent, la turbulence est modifiée sous l'influence de particules solides

*) En fait, les courbessont présentées en forme $\frac{I_N/N}{I_{N=1}} = f(N)$. Puisque le rapport $\frac{I_N}{N}$ est donné par un nombre quelconque, dont la valeur absolue n'a pas de signification physique concrète, nous avons divisé tous les $\frac{I_N}{N}$, arbitrairement, par $\frac{I_{N=1}}{1}$ . Ainsi, si la concentration relative, dont l'indice est $\frac{I_N}{N}$, ne change pas en fonction de la quantité totale des billes en suspension (donné par N), tous les points $\frac{I_N/N}{I_{N=1}}$ doivent être voisins de 1.

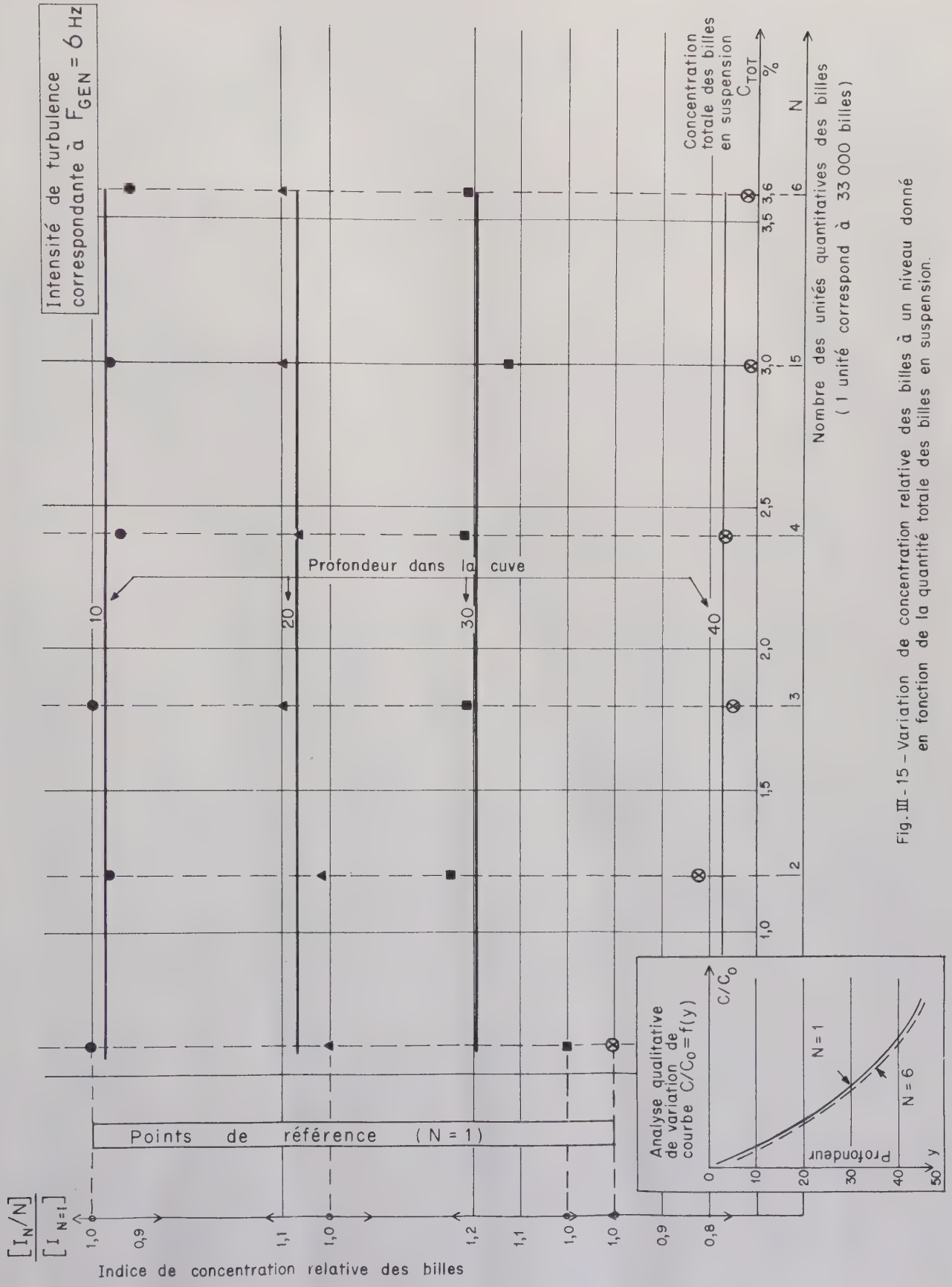



Fig. III-15 – Variation de concentration relative des billes à un niveau donné en fonction de la quantité totale des billes en suspension.

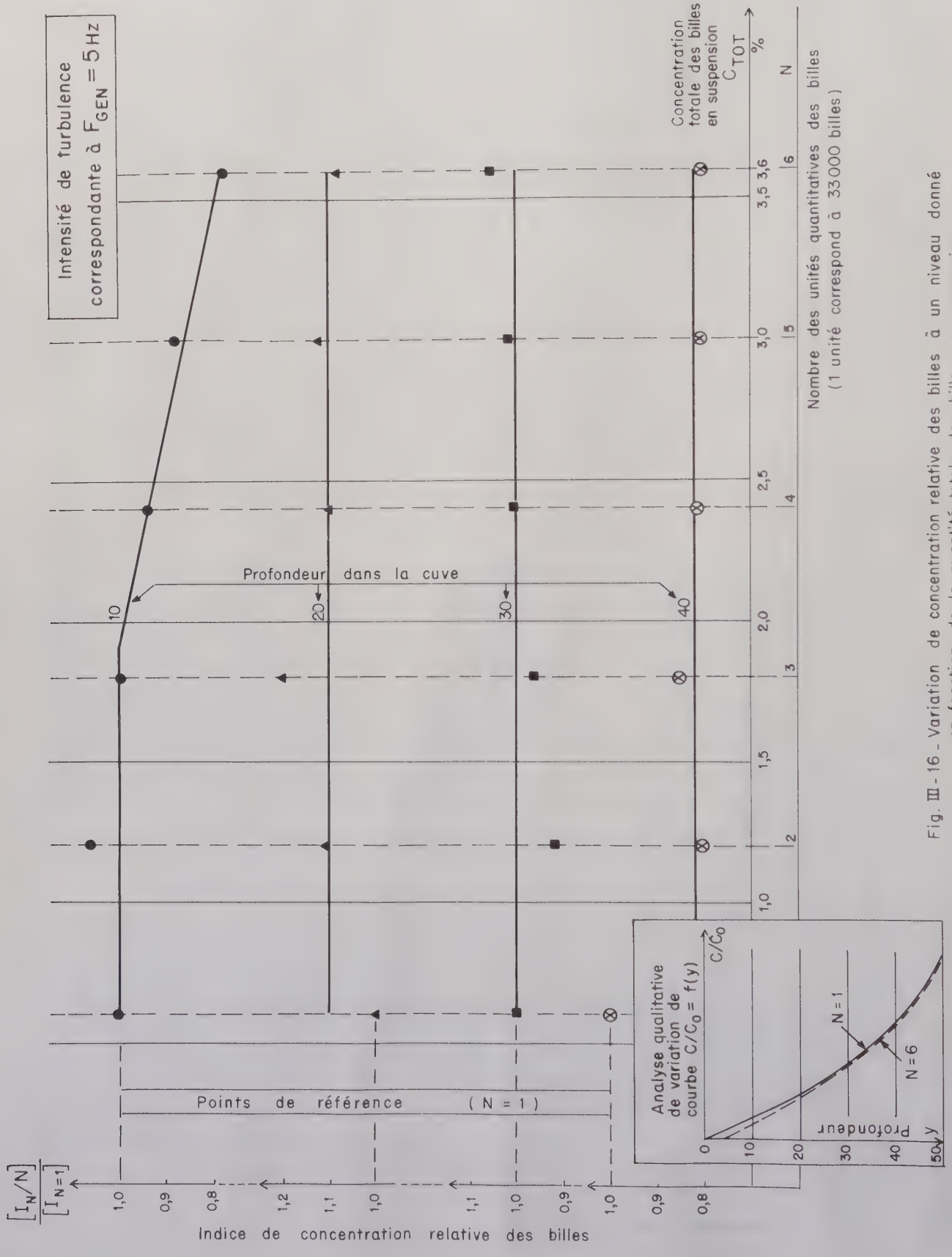



Fig. III-16 - Variation de concentration relative des billes à un niveau donné en fonction de la quantité totale des billes en suspension

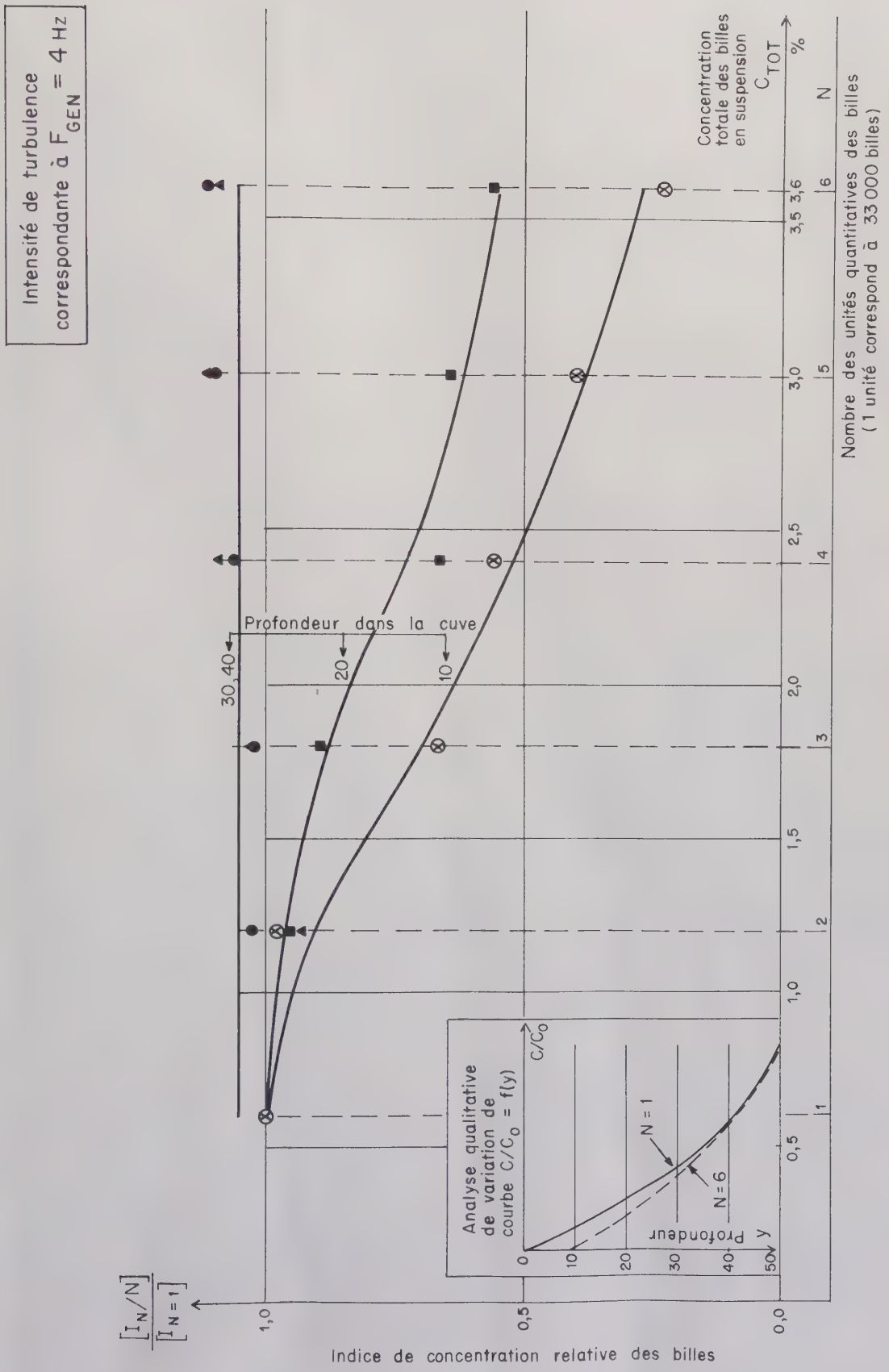



Fig. III-17- Variation de concentration relative des billes à un niveau donné en fonction de la quantité totale des billes en suspension.

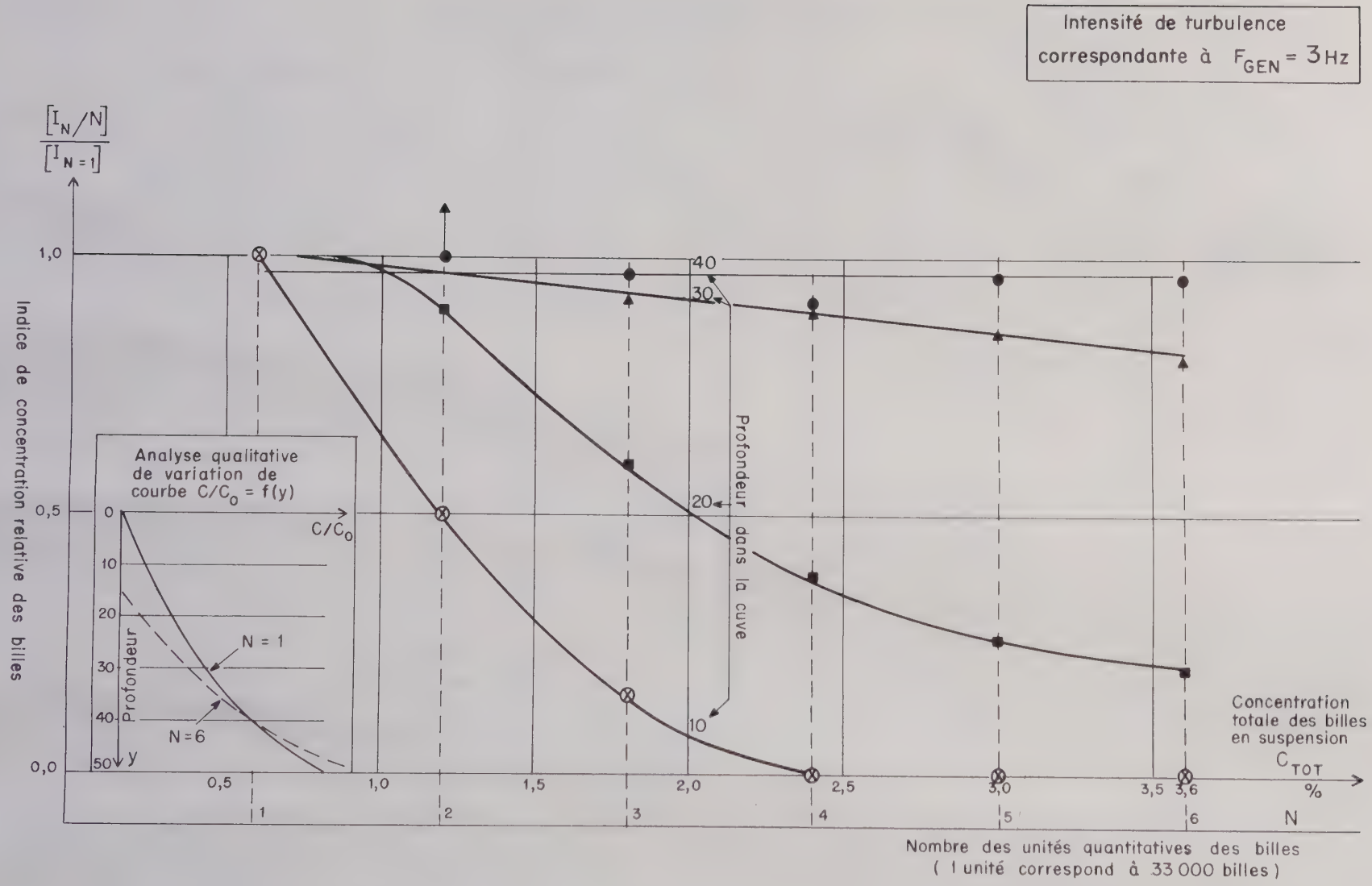



Fig. III - 18 - Variation de concentration relative des billes à un niveau donné en fonction de la quantité totale des billes en suspension.

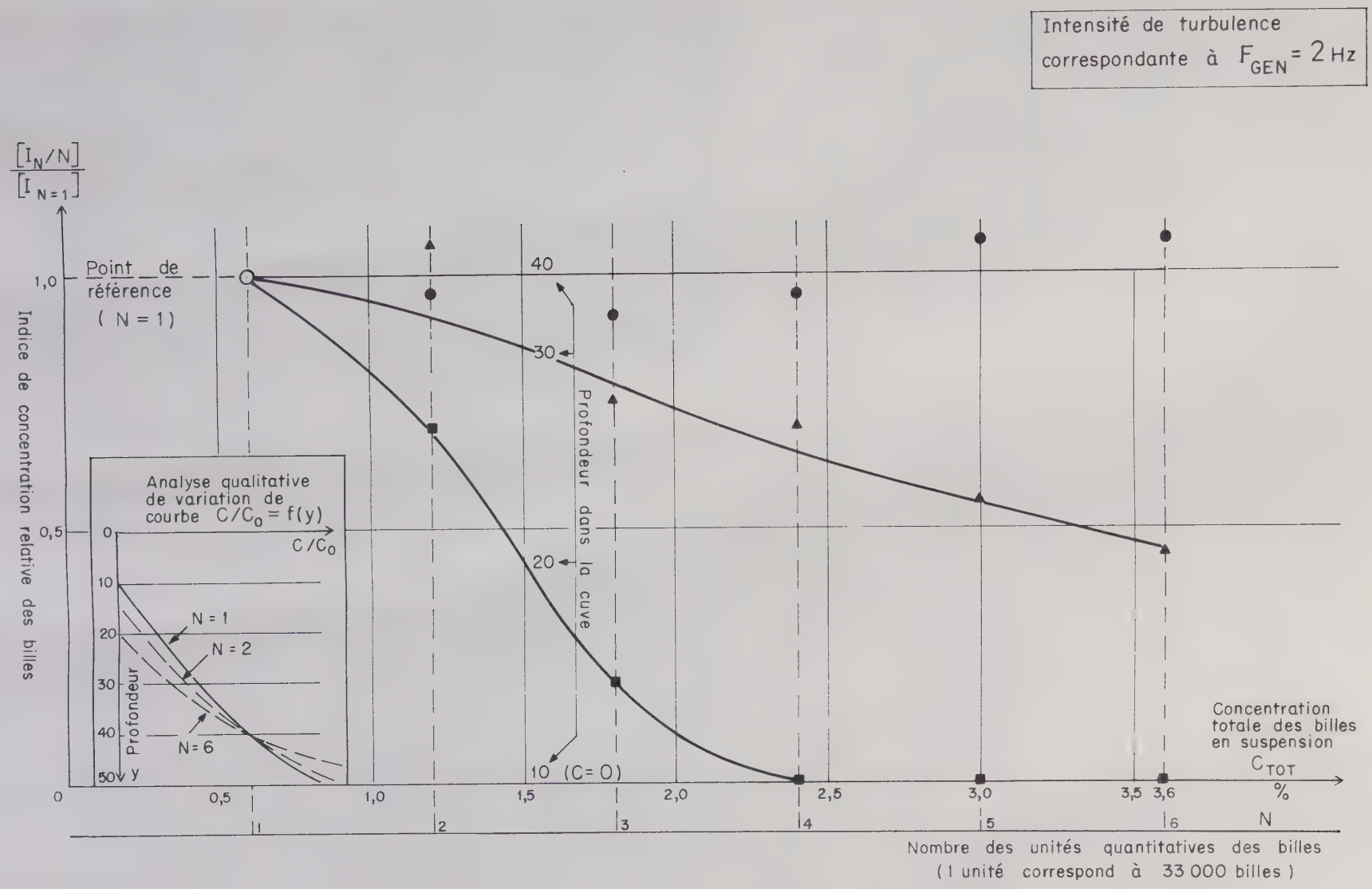



Fig. III - 19 – Variation de concentration relative des billes à un niveau donné en fonction de la quantité totale des billes en suspension.

en suspension.

D'après les figures III-(15-19), on peut constater que la concentration relative, dont l'indice est $\frac{I_N}{N}$ , diminue en fonction de la quantité totale de billes en suspension, exprimée par le nombre des unités de mesure N , d'autant plus que la turbulence créée dans la cuve est plus faible.

Cette tendance est encore plus mise en relief par la figure III-20 qui présente une part des résultats expérimentaux d'une autre façon - les courbes comparatives $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ pour cinq intensités de la turbulence créée, à un niveau donné dans la cuve (la profondeur 20) - Nous pouvons conclure aussi que la courbe $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(C_{TOT})$ a, en général, l'allure tracée sur la figure III-21 (a), avec deux asymptotes horizontales, à 0 et à 1.

- Pour $C \ll C_{lim}$ , la courbe est, en fait, représentée par la droite $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = 1$

- Pour $C > C_{lim}$ , la courbe $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ descend au-dessous de 1 et tend vers 0.

La concentration limite ($C_{lim}$), pour une catégorie donnée de particules solides, dépend, évidemment, de l'intensité de la turbulence. Observons, par exemple, les courbes $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ à niveau 20 dans la cuve (figure III-20). Nous pouvons constater que, dans le cas d'une forte intensité de la turbulence, créée dans la cuve ($F_{GEN}$ = 5 et 6 hz) la relation $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}}$ est donnée par une droite horizontale (la valeur correspondante est en effet, un peu plus grande que 1,0 , ce qui résulte, de même que la dispersion des points expérimentaux, du caractère aléatoire des grandeurs mesurées et du problème de précision de mesures). La quantité maximum disponible de billes en suspension dans la cuve ($C_{TOT}$ = 3,6 %) représente, donc, pour une forte turbulence, la concentration inférieure à sa concentration limite. La relation expérimentale $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ pour $F_{GEN}$ = 5 et 6 hz ne représente donc qu'une portion de la courbe générale (a). Ce cas est présenté sur la figure III-21 (C).

Par contre, pour l'intensité de la turbulence créée dans la cuve plus faible ($F_{GEN}$ = 2, 3 et 4 hz) ; les courbes $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ descendent au-dessous de 1. La quantité maximum disponible de billes dans la cuve est donc supérieure à la concentration limite pour ces 3 cas. Pour le cas extrême ($F_{GEN}$ = 2 hz), la capacité de suspension (à ce niveau - la profondeur 20 cm) tombe déjà après N = 4 à zéro, et on voit l'allure complète de la courbe générale $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ . Ce cas est présenté sur

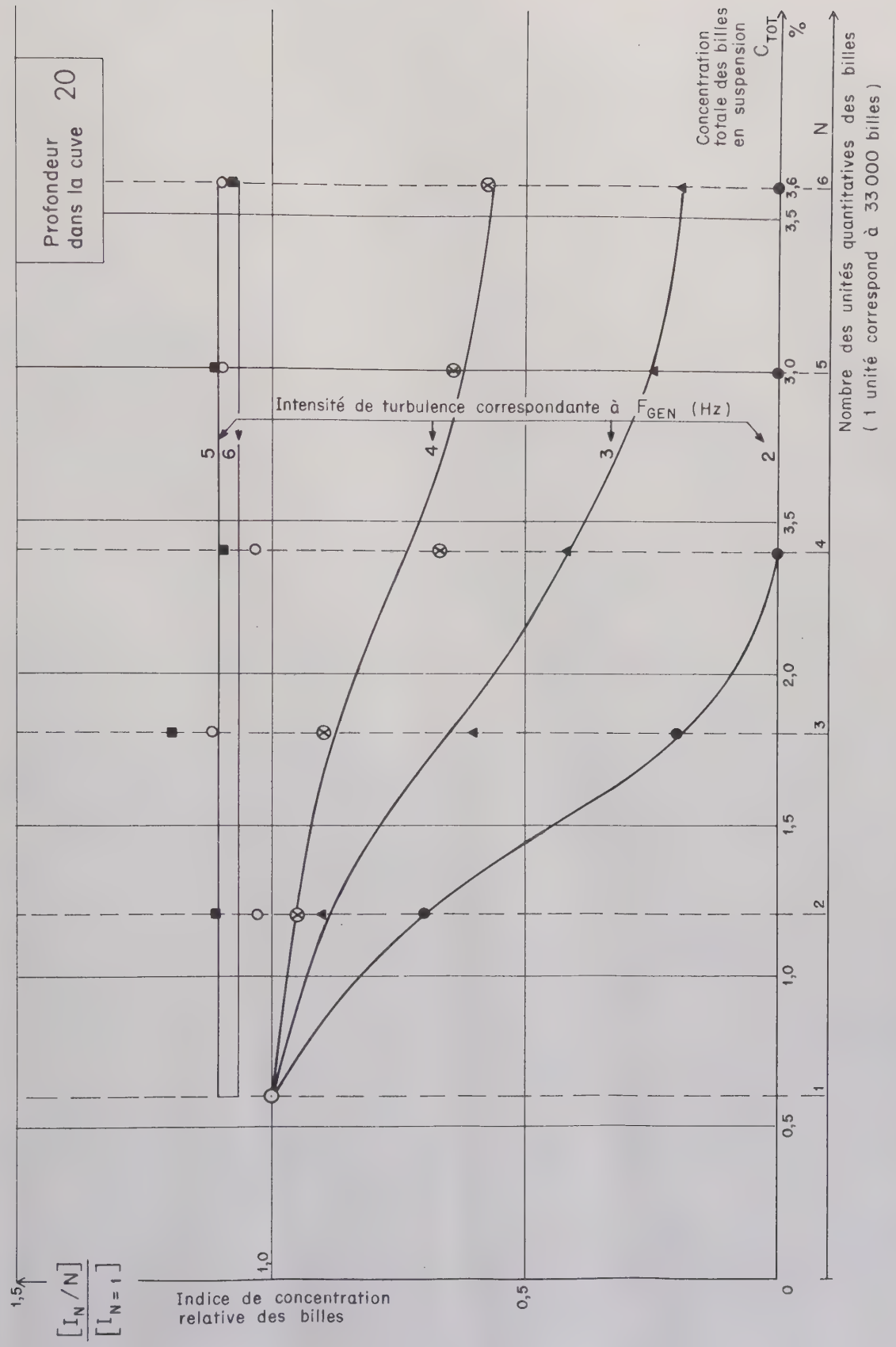
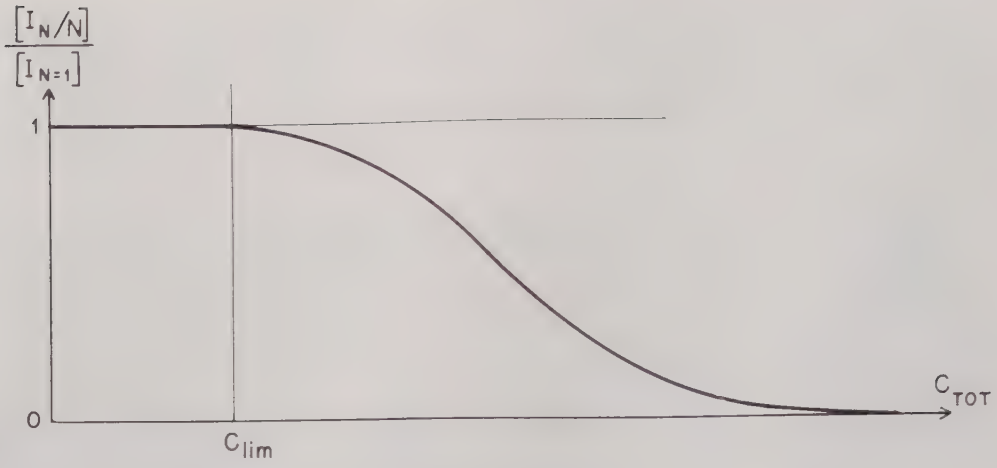



Fig. III-20 – Variation de concentration relative des billes à un niveau donné en fonction de la quantité totale des billes en suspension.

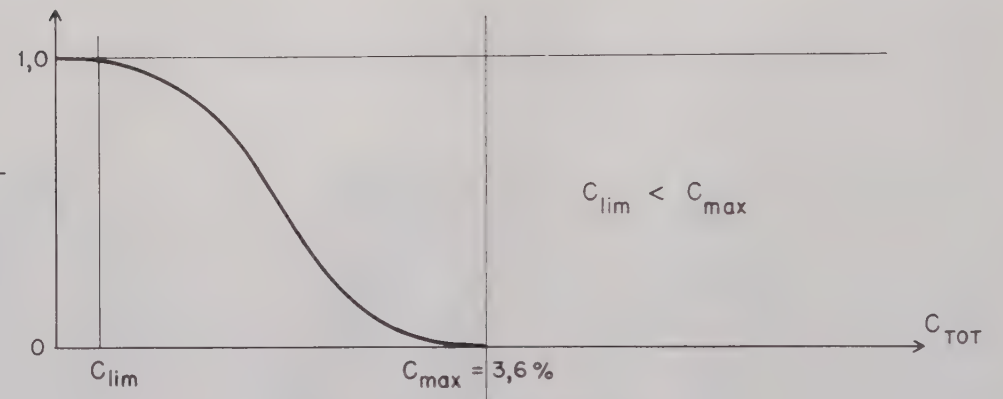
a) Allure générale




$C_{lim}$ – Concentration limite

b) Faible turbulence

($F_{GEN}$ = 2 hz)




quantité maximum disponible de billes en suspension dans la cuve

c) Forte turbulence

($F_{GEN}$ = 6 hz)

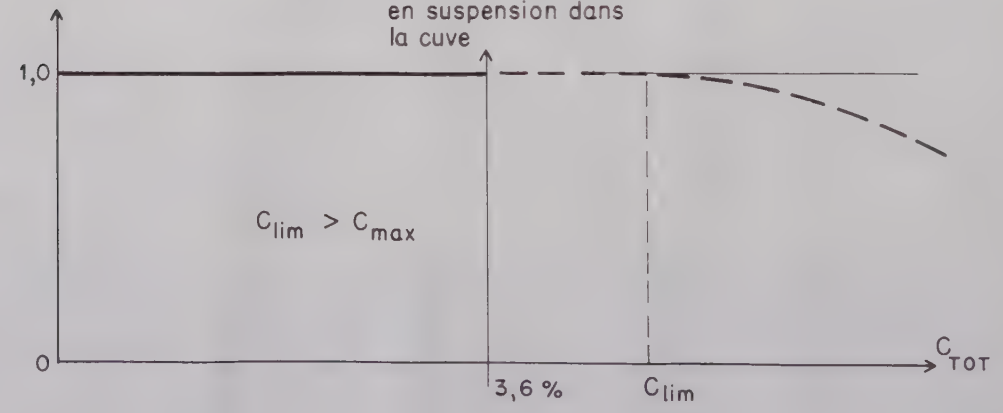



Fig. III - 21 – Allure de la courbe $\frac{I_N/N}{I_{N=1}} = f(C_{TOT})$

la figure III-21 (b).

Suivant les tendances des points expérimentaux, exprimant la relation $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$, conformément à l'explication donnée ci-dessus, nous avons tracé qualitativement les courbes de concentration relative de particules solides en fonction de la profondeur, $C/C_o = f(y)$. On peut remarquer que, plus la turbulence est faible, plus cette courbe change l'allure avec la variation de la quantité totale de billes en suspension, dans la cuve. Les deux cas extrêmes, dans le cadre de notre étude expérimentale, sont les plus représentatifs à cet égard. Dans le cas d'une forte turbulence ($F_{GEN}$ = 6 hz - fig. III-15) la forme de la courbe $C/C_o = f(y)$ ne change pas avec la variation de la quantité totale de billes en suspension, tandis qu'elle change beaucoup si la turbulence, créée dans la cuve, est faible ($F_{GEN}$ = 2 hz - figure III-19). Ces résultats confirment tout à fait les impressions suggérées par l'examen des photographies sur les figures III-13 et 14. L'explication de ce phénomène réside, comme nous avons vu, dans le rapport entre les efforts liés aux réactions des particules solides sur la turbulence et les efforts qui accompagnent le mouvement turbulent du fluide. Une même quantité de billes en suspension est une fois, pour la turbulence forte, au-dessous de la concentration limite, correspondante à cette intensité de turbulence, une autre fois, pour la turbulence faible, cette quantité de billes dépasse la concentration limite correspondante à ce cas.

Nous avons indiqué au paragraphe 4.1 que, dans le mécanisme complexe de l'intéraction entre la suspension de particules solides et la turbulence de l'écoulement porteur, le paramètre essentiel est vraisemblablement le rapport entre la vitesse turbulente dans l'eau pure et la vitesse de chute des particules solides, ($\frac{U_o'}{W}$). Nous avons essayé de mettre en évidence l'influence de ce paramètre dans le cadre de résultats expérimentaux de notre étude. Nous avons fait les mesures de concentration de billes pour 20 valeurs différentes de la vitesse turbulente à niveau de mesure (5 intensités de turbulence créées, par 4 niveaux de mesure dans la cuve) et aussi nous avons disposé de 20 valeurs de paramètre ($\frac{u_o'}{W}$). D'autre part, nous avons pris comme l'indice global du changement de la concentration relative à un niveau en fonction de la quantité totale de billes en suspension, le rapport $\alpha_c = \frac{I_{6/6}}{I_1}$ ($I_6$ - l'indice de concentration à niveau donné, pour la quantité totale de billes dans la cuve, correspondante à 6 unités de mesure, qui font $C_{TOT}^{max}$ = 3,6 %, $I_1$ correspond à 1 unité, $C_{TOT}$ = 0,6 %).

Les valeurs numériques de $u_o'$ pour tous les cas expérimentaux et les valeurs de $\alpha_c$, déterminées à partir des courbes $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$, sont données au tableau ci-dessous.

| Profond. | 10 | | | 20 | | | 30 | | | 40 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $F_{GEN}$ | $u'_o$ cm/s | $\frac{u'_o}{W}$ | $\alpha_C$ | $u'_o$ cm/s | $\frac{u'_o}{W}$ | $\alpha_C$ | $u'_o$ cm/s | $\frac{u'_o}{W}$ | $\alpha_C$ | $u'_o$ cm/s | $\frac{u'_o}{W}$ | $\alpha_C$ |
| 2 | 3,6 | 0,27 | 0 | 4,2 | 0,31 | 0 | 5,0 | 0,37 | 0,45 | 8,0 | 0,59 | 1,00 |
| 3 | 4,5 | 0,33 | 0 | 5,0 | 0,37 | 0,20 | 6,0 | 0,45 | 0,80 | 10,0 | 0,74 | 0,96 |
| 4 | 5,0 | 0,37 | 0,25 | 6,0 | 0,45 | 0,55 | 7,5 | 0,56 | 1,05 | 12,3 | 0,91 | 1,05 |
| 5 | 5,7 | 0,42 | 0,77 | 7,2 | 0,53 | 1,10 | 9,3 | 0,69 | 1,00 | 15,0 | 1,11 | 0,82 |
| 6 | 6,7 | 0,50 | 0,97 | 8,3 | 0,61 | 1,07 | 10,7 | 0,80 | 1,19 *) | 17,5 | 1,30 | 0,78 *) |

$u'_o$ - vitesse turbulente dans l'eau pure

$$\alpha_C = \frac{I_6/6}{I_1} \qquad W = 13,5 \text{ cm/sec.}$$

La relation $\alpha_C = f\left(\frac{u'_o}{W}\right)$ est présentée sur la fig. III-22.

La signification de $\alpha_C$ est évidente :

- $\alpha_C = 1$ (en fait, à cause de la dispersion des points expérimentaux, $\alpha_C \approx 1$), signifie que la concentration relative, égale au rapport entre la concentration absolue à un niveau donné et la quantité totale de billes en suspension, est constante. Cela provient du fait que la concentration limite pour ce cas n'est pas encore atteinte.

- $\alpha_C < 1$ signifie que la concentration relative décroît en fonction de la quantité totale de billes. La concentration limite est dépassée et la turbulence est modifiée sous l'influence de particules solides.

- $\alpha_C = 0$ signifie qu'il n'y a plus de billes à niveau donné, pour la quantité totale maximum ($C_{TOT} = 3,6$ %) de billes dans la cuve. La turbulence étant diminuée sous l'influence de particules solides en suspension, la capacité de suspension à ce niveau est tombée à 0.

*) L'écart considérable de ces valeurs, qui correspondent aux points 1' et 1" sur la figure III-22, par rapport à 1,00, peut être expliqué comme la conséquence du phénomène des heurts entre les billes en suspension et la plaque en mouvement. Ce phénomène, à la fréquence maximum de la plaque ($F_{GEN} = 6$ hz), est important et peut perturber la concentration de billes dans la partie inférieure de la cuve.

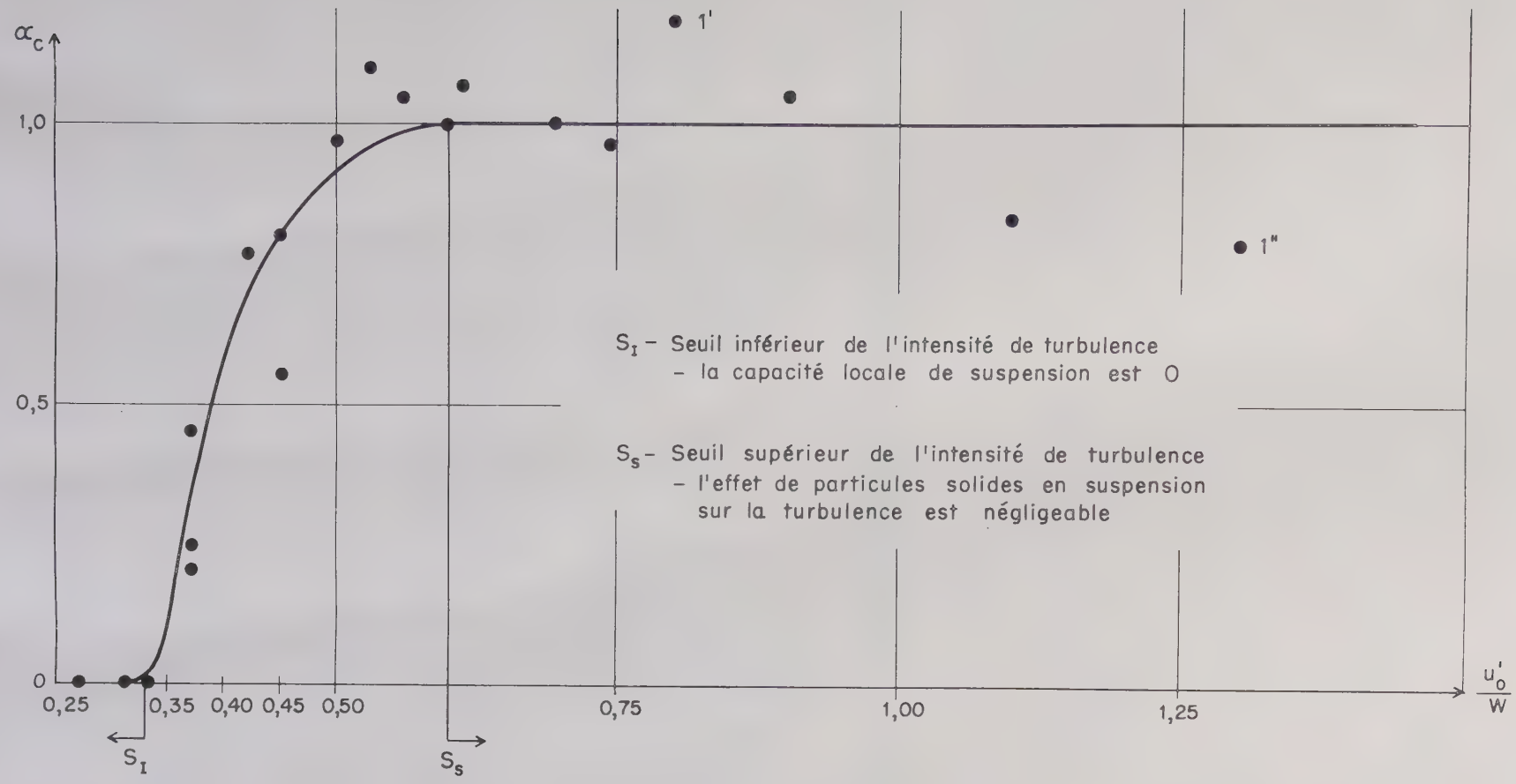



Fig. III - 22 – Relation entre $\alpha_c = \frac{I_6/6}{I_1}$ à un niveau donné et la vitesse turbulente correspondante.

# CHAPITRE IV

## MESURES PAR LA METHODE DU CAPTEUR DE PRESSION

### 1 - BUT D'APPLICATION DU CAPTEUR DE PRESSION DANS LE CADRE DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

L'application de la méthode du capteur de pression, dans le cadre de notre étude expérimentale, avait son intérêt comme annexe de la partie des essais au fil chaud, au point de vue de mesure de turbulence en présence des particules solides en suspension, compte tenu du fait que les mesures au fil chaud avec protecteur ont été limitées pour les raisons expliquées, aux cas de concentration relativement faibles.

L'avantage de cette méthode par rapport à celle du fil chaud, pour les mesures de turbulence en présence des particules solides, est évidente, étant donné que le système de mesure au capteur de pression n'est ni fragile ni sensible aux heurts avec les corps en suspension.

Les deux principaux objectifs de cette partie de notre étude expérimentale ont été les suivants :

- Mesurer la turbulence dans l'eau pure, afin d'établir la relation entre les grandeurs mesurées au capteur de pression et les vitesses turbulentes, déjà mesurées au fil chaud.

- Mesurer la turbulence en présence de particules solides en suspension (en particulier, dans le cas de forte concentration), afin de compléter les mesures effectuées au fil chaud, là où elle ne donneraient plus de bons résultats.

## 2 - MISE AU POINT DE LA METHODE.

### 2.1 - Principe de mesure.

Le capteur de pression mesure les fluctuations de la pression totale en un point de l'écoulement du fluide. Le système de mesure comprend une prise de pression dynamique, le capteur de pression proprement dit et l'ensemble électronique. Le capteur de pression (ou le transducteur) est constitué essentiellement d'un diaphragme métallique avec un moyen de mesurer son déplacement sous l'influence d'une pression. Dans les techniques actuelles, on fait appel soit aux jauges de contrainte, soit aux moyens de détection des modifications de capacité ou de résistance magnétique engendrées par le déplacement du diaphragme.

Dans la théorie des capteurs de pression [1], [19] on assimile un transducteur à diaphragme à un piston à ressort, l'élasticité de ce dernier étant basée sur la valeur moyenne du déplacement. Avec cette hypothèse, on calcule les caractéristiques essentielles du capteur - la fréquence propre, la réponse en fréquences et le coefficient d'amortissement.

### 2.2 - Analyse de grandeur mesurée.

L'application de la méthode du capteur de pression pour les mesures de turbulences est liée à un problème important : La grandeur qu'on mesure n'est pas pure et bien définie comme dans le cas du fil chaud (la vitesse turbulente), mais elle est complexe, contenant la fluctuation de pression, la fluctuation de vitesse du fluide et les corrélations entre ces deux grandeurs.

La pression totale, détectée par une prise de pression dynamique dans un point de l'écoulement et exprimée en colonne d'eau, est donnée par :

$$h = \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \qquad \text{(IV-1)}$$

Appliquons le procédé des moyennes, en introduisant :

$$h = \bar{h} + h' \qquad p = \bar{p} + p' \qquad v = \bar{v} + v' \qquad \text{(IV-2)}$$

La fluctuation de pression totale est donnée par l'expression :

$$h' = \frac{p'}{\gamma} + \frac{\overline{V}\,V'}{g} + \frac{V'^2}{2g} - \frac{\overline{V'^2}}{2g} \qquad \text{(IV-3)}$$

La valeur quadratique moyenne des fluctuations de pression totale, exprimée en colonne d'eau, contient les termes suivants :

$$\overline{h'^2} = \frac{\overline{p'^2}}{\gamma^2} + \frac{2\overline{V}}{\gamma g}\,\overline{p'V'} + \frac{\overline{p'V'^2}}{\gamma g} + \frac{\overline{V}^2\,\overline{V'^2}}{g^2} + \frac{\overline{V}}{g^2}\,\overline{V'^3} + \frac{\overline{V'^4}}{4g^2} - \frac{(\overline{V'^2})^2}{4g^2} \qquad \text{(IV-4)}$$

Etant donnée la complexité de cette expression, on ne peut pas établir la relation directe entre $\overline{h'^2}$ et $\overline{V'^2}$. Pourtant, on peut dire que la valeur mesurée par capteur de pression, caractérise, au moins qualitativement, l'intensité de turbulence donnée. Dans le cadre de notre étude expérimentale, cette incertitude, liée à l'application du capteur de pression, est réduite dans une grande mesure, parce que, en effet, le but de nos essais consiste à comparer la turbulence en présence des particules solides et celle dans l'eau pure, mesurée toutes les deux par même méthode du capteur de pression. On peut admettre que le rapport entre ces deux valeurs, qui, en fait nous intéresse, a une signification plus certaine que les valeurs absolues.

## 2.3 - Système de mesure.

Comme nous avons indiqué, le système de mesure est constitué, en général, par une prise de pression dynamique, par le capteur de pression (le transducteur) et par l'ensemble électronique. Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé comme prise de pression un tube de Pitot, de longueur 20 cm et de diamètre intérieur 3 mm. Nous avons disposé pour nos essais des capteurs à variation de mutuelle induction ACB-H50 de 2 et 5 mbars. L'ensemble électronique comprend les systèmes d'alimentation du transducteur (coffret de servitudes ACB-317D), le système de filtrage, destiné à éliminer les phénomènes parasites superposés à celui qui doit être étudié (Baie d'adaptation ACB-914D), l'oscilloscope et le voltmètre-intégrateur.

Les capteurs de pression, en général, ne sont pas destinés à être plongés dans l'eau. Dans notre cas, il fallait trouver une solution pour mesurer la turbulence aux différents niveaux de la cuve, le capteur étant hors de l'eau. Installer le capteur au-dessus de la surface libre et plonger un long tube jusqu'au point de mesure, n'était pas une bonne solution : pour mesurer la pression au fond de la cuve, il fallait utiliser un tube de 50 cm de longueur et la longueur de ce tube réduit la fréquence propre du système. Pour cette raison, nous avons percé les trous dans une paroi de la cuve afin d'introduire directement le tube de Pitot dans le milieu. En fait,

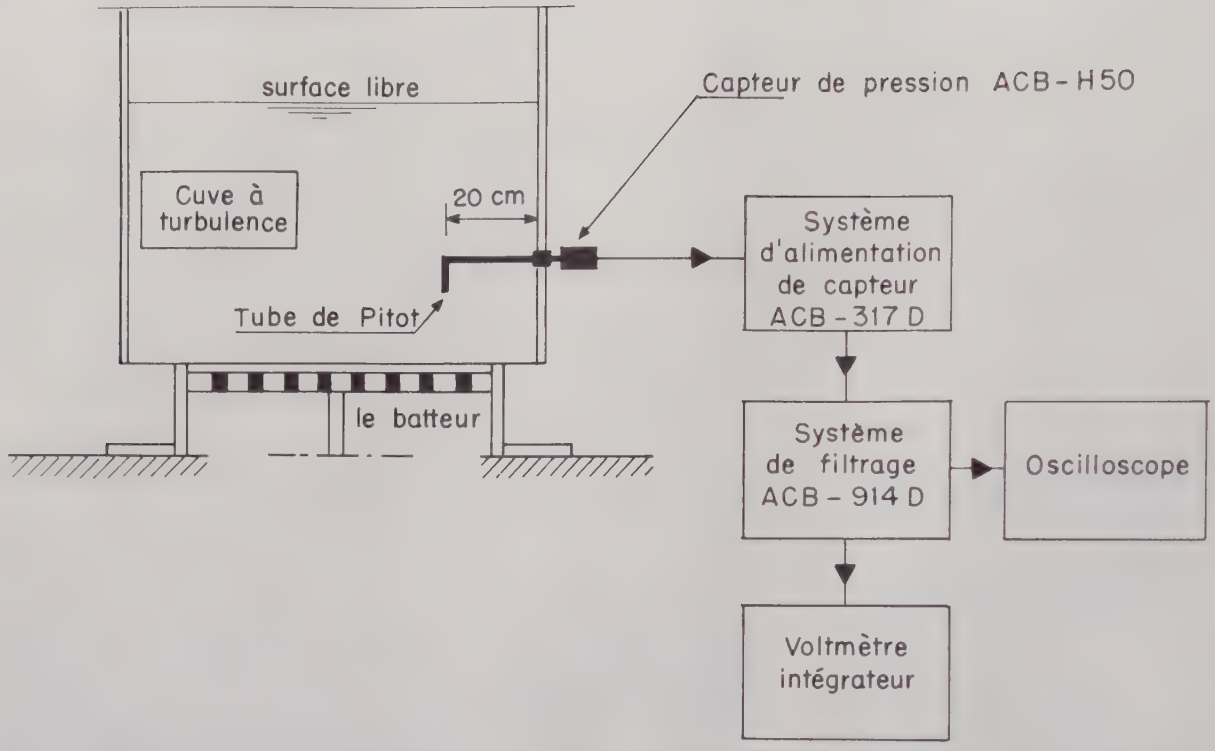



Fig. IV - 1 – Ensemble de mesure par la méthode de capteur de pression.

pour assurer l'étanchéité, il fallait boucher le trou d'un bouchon en caoutchouc, à travers duquel nous avons passé le tube de Pitot.

Le schéma d'ensemble de mesure au capteur de pression est donné sur la figure IV-1.

2.4 - Procédé expérimental.

L'étape préliminaire des mesures au capteur de pression consistait à étalonner le capteur, c'est-à-dire trouver la relation entre la pression, exprimée en colonne d'eau, et le signal électrique correspondant, transmis par le système électronique et lue sur voltmètre-intégrateur. Nous avons effectué l'étalonnage du capteur en variant la profondeur de l'eau dans la cuve. Pour une pression hydrostatique donnée, nous avons mesuré la tension du signal sorti du capteur. La relation entre la pression mesurée et la tension du courant sorti est linéaire, ce qui représente un avantage par rapport à la méthode du fil chaud.

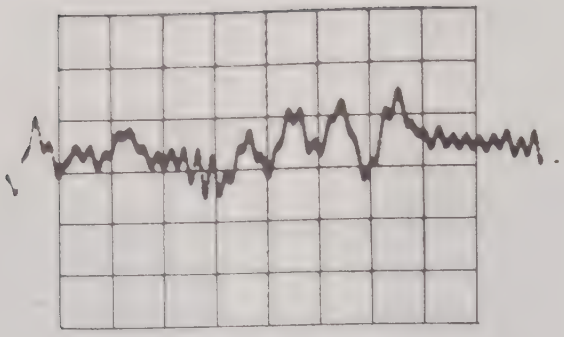
En ce qui concerne la mesure de la valeur quadratique moyenne du signal turbulent, le procédé est le même que pour les mesures au fil chaud : le voltmètre-intégrateur élève les fluctuations au carré et donne, pour une base de temps choisie, la valeur de la tension efficace.

3 - MESURES DANS L'EAU PURE.

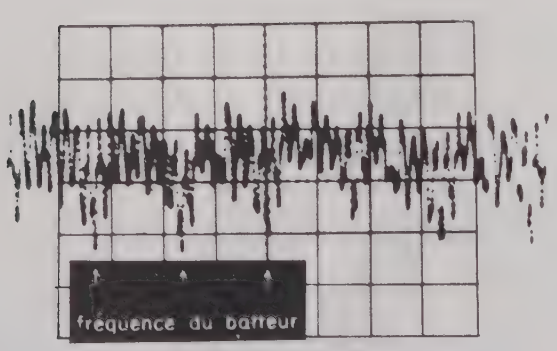
3.1 - Phénomène de la propagation des ondes de pression du générateur de la turbulence dans la cuve.

La première étape d'utilisation du capteur de pression, dans le cadre de notre étude, comprend les mesures dans l'eau pure, afin d'établir la relation entre les valeurs mesurées au capteur de pression et les vitesses turbulentes, déjà mesurées au fil chaud.

D'ailleurs, la comparaison des mesures de turbulence par ces deux méthodes représente aussi un intérêt en lui-même. Cependant, on a découvert, dès le début des mesures, un phénomène intéressant mais qui représentait un inconvénient au point de vue des mesures de turbulence. Ce phénomène provenait de la conception de base de notre installation - la méthode par laquelle la turbulence dans la cuve est engendrée - En effet, le mouvement va-et-vient de la plaque perforée, qui crée la turbulence, provoque en même temps une forte variation de pression de l'eau dans la cuve. Cette perturbation de pression, sous la forme de variation périodique, au fond de la cuve, se



Une division horizontale correspond à 0,05 sec.




Une division horizontale correspond à 0,20 sec.

FIG. IV-2 VUE DU SIGNAL TURBULENT ENREGISTRE PAR LE CAPTEUR DE PRESSION

propage, par les ondes de pression, dans tout le volume. C'est pourquoi, dans chaque point de la cuve, le capteur de pression enregistre une fluctuation périodique. En fait, le signal sorti du capteur, que l'on voit sur l'oscilloscope, est composé de cette fluctuation périodique et du signal propre turbulent (fig. IV-2). C'est-à-dire, on a la superposition d'un signal périodique et d'un signal aléatoire.

La fréquence du signal périodique "parasite" (au point de vue de la mesure de turbulence) est la même, bien entendu, que la fréquence du mouvement du batteur. Son amplitude décroît avec la distance de la plaque. La figure IV-3 montre la courbe de densité spectrale d'un signal sortie du capteur de pression. On peut remarquer deux "pics parasites", celui de la fréquence propre du batteur (à 3 hz) et celui de la fréquence propre du système du capteur de pression (30 hz).

3.2 - Relation entre les mesures au fil chaud et au capteur de pression.

Toutes les mesures ont été effectuées pour trois intensités différentes de turbulence (correspondantes aux fréquences de la plaque 3, 4 et 5 hz). Les deux cas extrêmes, dans le cadre des mesures à fil chaud (les fréquences du batteur 2 et 6 hz) ne sont pas entrés dans le cadre des mesures au capteur de pression. Pour une très forte turbulence (6 hz), les vibrations des parois sont accentuées, et, comme elles sont transmises par bouchon de caoutchouc au tube Pitot, le capteur les enregistre, ce qui perturbe le signal de mesure. Si la turbulence est très faible (2 hz), l'intensité du signal mesuré est au-dessous de la sensibilité du voltmètre intégrateur et la lecture n'est plus exacte.

Les résultats des mesures au capteur de pression dans l'eau pure sont présentés sur la figure IV-4, parallèlement aux mesures correspondantes de vitesses turbulentes au fil chaud. On peut constater, en dépit de l'existence du phénomène parasite de propagation des ondes de pression du fond de la cuve, un certain accord qualitatif de ces deux mesures indépendantes. Cela confirme l'hypothèse que les valeurs mesurées avec le capteur de pression caractérisent, au moins qualitativement, l'intensité de turbulence.

On peut remarquer sur la figure IV-4 que l'écart relatif entre les courbes $\frac{\overline{u^2}}{g}(y)$ et $\sqrt{\overline{h'^2}}(y)$ augmente à mesure que la profondeur diminue. A un niveau donné, le rapport entre les grandeurs correspondantes, mesurées par fil chaud et par le capteur de pression, est à peu près constant pour toutes les 3 intensités de la turbulence, créée dans la cuve. Ce rapport $\left(\sqrt{\overline{h'^2}}\right)/\left(\frac{\overline{u'^2}}{g}\right)$ augmente avec la profondeur (de 1,30 au fond de la cuve à 2,80 vers la surface libre). Ce phénomène peut être expliqué, d'une part, par l'effet des ondes de pression - la contribution du signal pério-

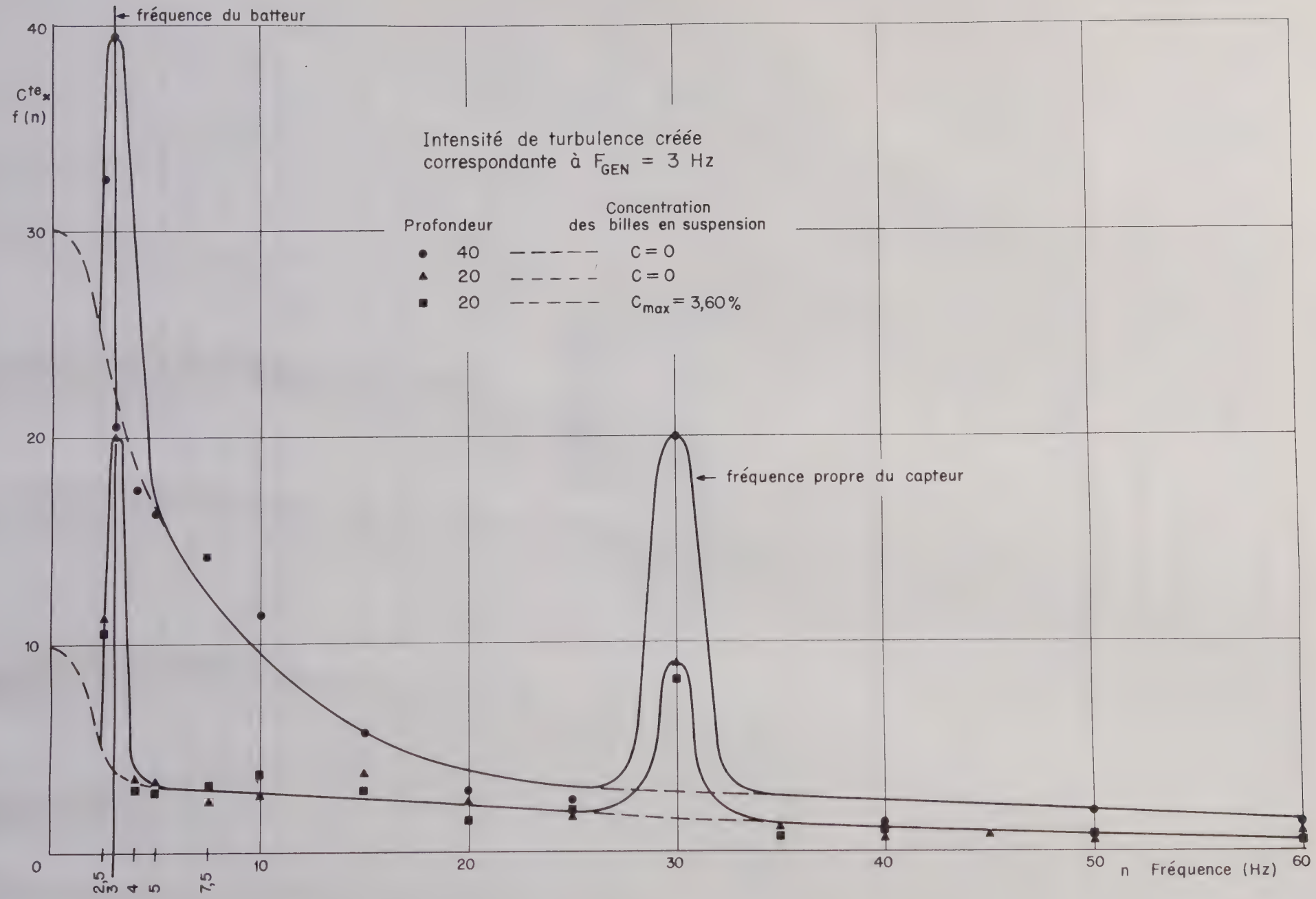



Fig. IV-3 - Spectres (analyse spectrale des signaux du capteur de pression).

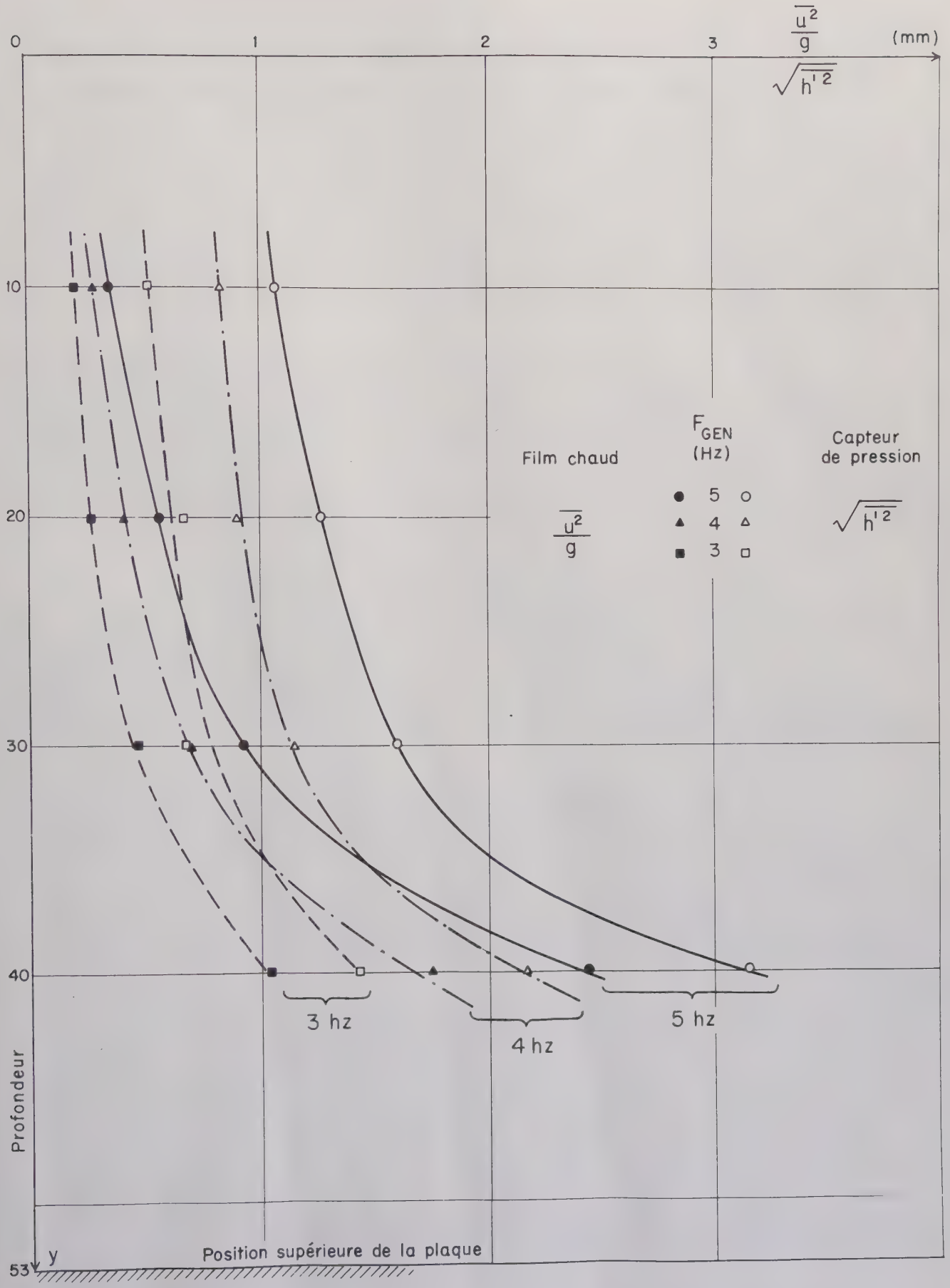



Fig. IV-4 — Comparaison des mesures au fil chaud et au capteur de pression.

dique à la totalité du signal sorti du capteur n'est pas la même dans tous les cas - Le signal propre turbulent décroît plus vite que le signal périodique en fonction de la distance de la plaque. Par conséquent, l'influence du phénomène de la propagation des ondes de pression, provenant du générateur de la turbulence, est plus accentuée vers la surface libre où la turbulence est plus faible. D'ailleurs, on peut remarquer sur la courbe de densité spectrale du signal sorti du capteur, (fig. IV-3), que le rapport entre la surface correspondante au pic parasite, dû au phénomène des ondes de pression, et la surface totale au-dessous de la courbe est plus grande pour la profondeur 20 que pour la profondeur 40.

Mais, soulignons que ces considérations expliquent seulement d'une part la divergence des courbes $\sqrt{\overline{h'^2}}(y)$ et $\frac{\overline{u^2}}{g}(y)$ — même si l'on élimine, par le calcul, les pics parasites, le rapport entre ces valeurs, pour une intensité de la turbulence donnée, n'est pas constant, mais diminue en fonction de la profondeur.

## 4 - MESURES EN PRESENCE DE PARTICULES SOLIDES EN SUSPENSION.

La deuxième étape des essais au capteur de pression consistait à mesurer la turbulence en présence des particules solides en suspension, afin de compléter les mesures effectuées par fil chaud. On pouvait, en effet, mesurer la turbulence au fond de la cuve, où la concentration est très grande, et aussi le cas de forte intensité de turbulence créée dans la cuve, quand on a une concentration homogène et assez forte dans tout le volume.

Nous avons donc procédé aux mesures pour la concentration totale (la quantité totale des billes) variable, avec trois intensités turbulentes différentes (3, 4 et 5 hz) aux quatre niveaux de la cuve (10, 20, 30, 40 cm de profondeur).

Sur les figures IV-5, 6, 7 et 8 sont présentés les résultats de mesures pour trois cas de l'intensité turbulente ($F_{GEN}$ égale à 3, 4 et 5 hz).

On peut comparer les résultats des mesures pour la turbulence ($F_{GEN}$ = 3 hz) (fig. IV-6) dans la partie supérieure de la cuve (niveaux 10 et 20) avec les mesures correspondantes au fil chaud (fig. III-9). On ne trouve pas seulement l'accord qualitatif des résultats (la même tendance de réduction de turbulence), mais aussi l'accord quantitatif. Dans la partie inférieure de la cuve (nous n'avons pas pu mesurer la turbulence avec le fil chaud), on peut remarquer une faible réduction de turbulence au niveau 30, tandis qu'au niveau 40 (au fond de la cuve) la turbulence reste pratiquement inchangée en présence des particules solides en suspension.

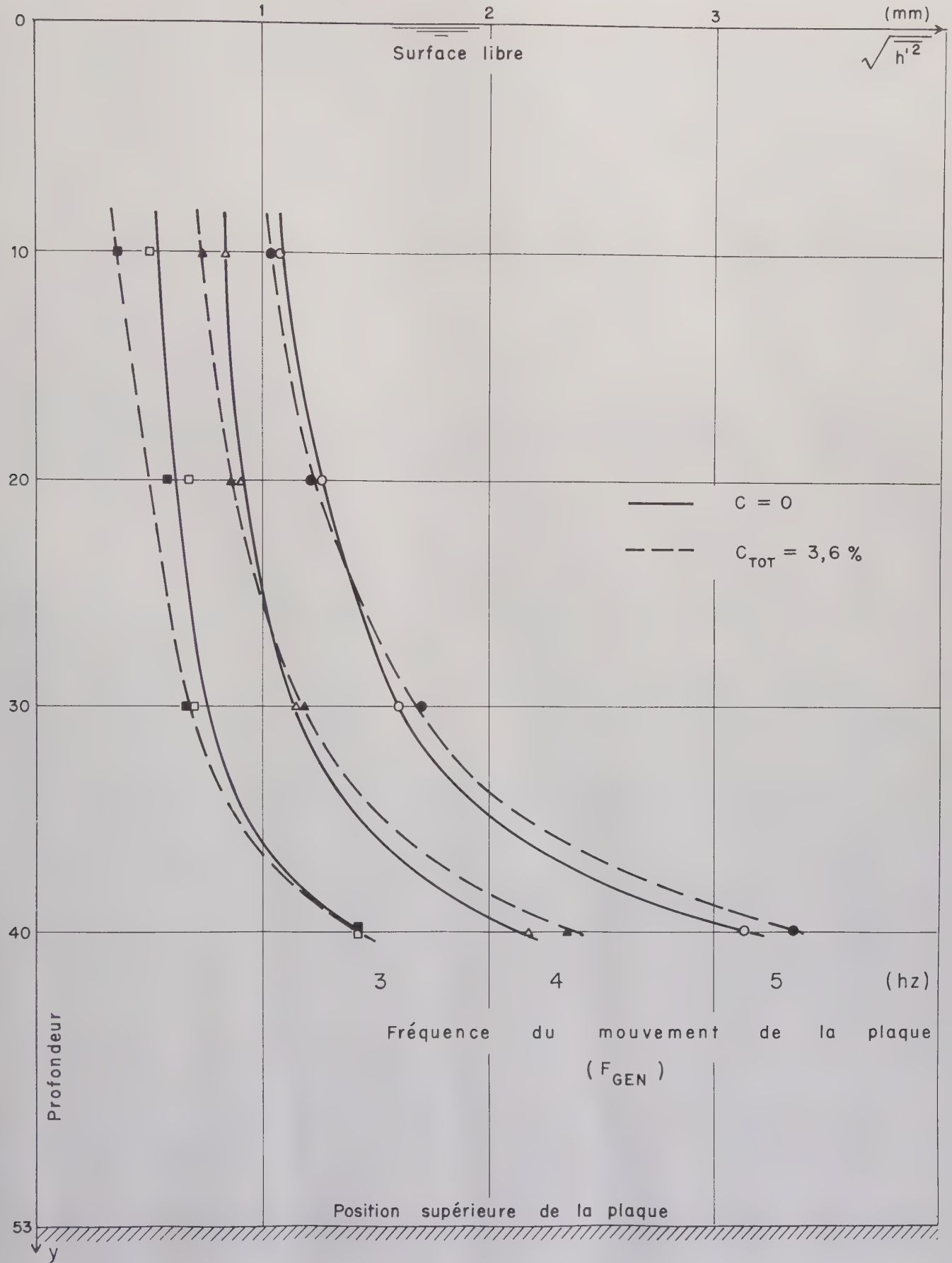



Fig. IV-5 - Modification des grandeurs mesurées au capteur de pression sous l'influence de particules solides en suspension.

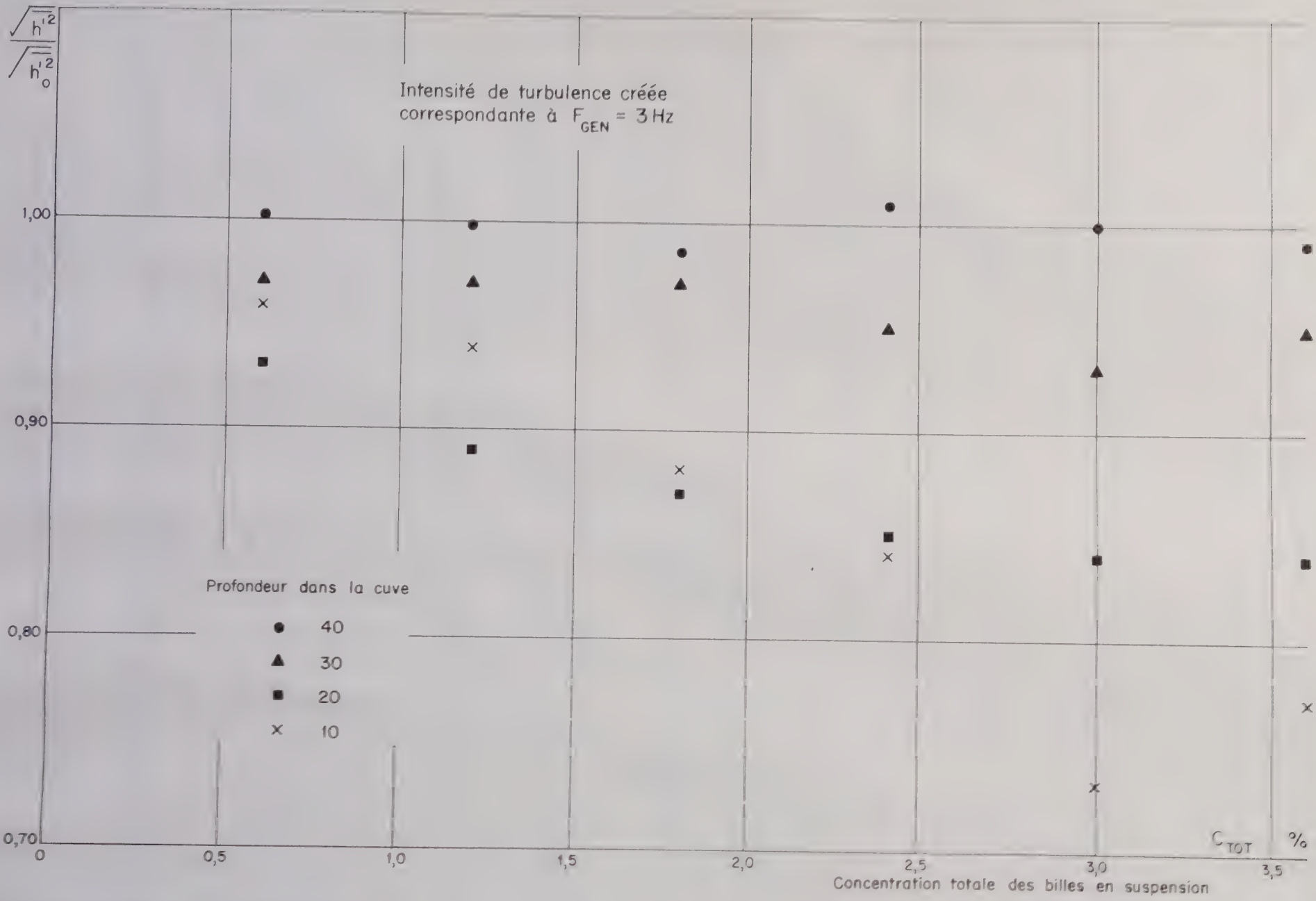



Fig. IV-6 — Réduction des grandeurs mesurées au capteur de pression par rapport à l'eau pure en présence des particules solides en suspension.

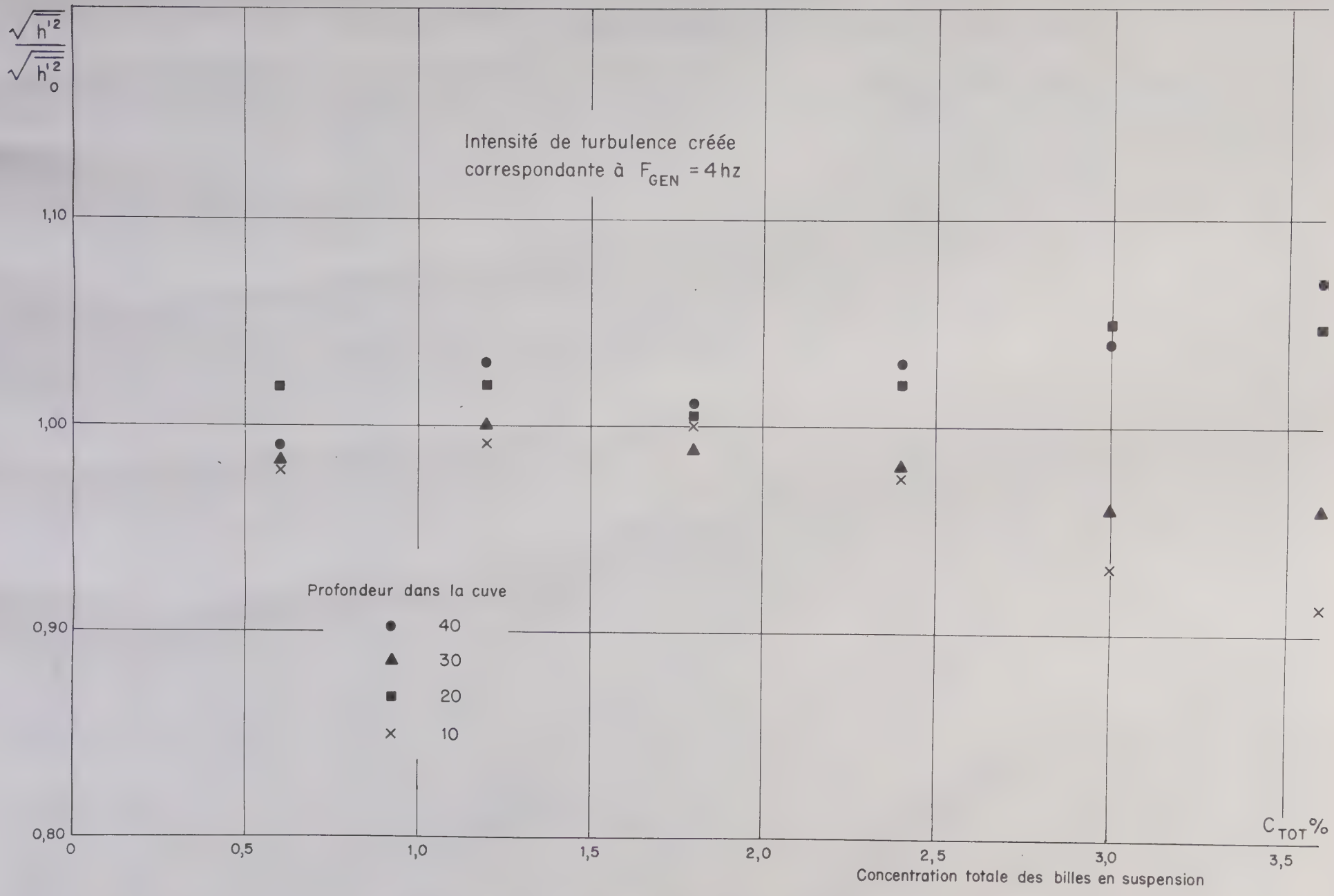



Fig. IV- 7 – Réduction des grandeurs mesurées au capteur de pression par rapport à l'eau pure en présence des particules solides en suspension.

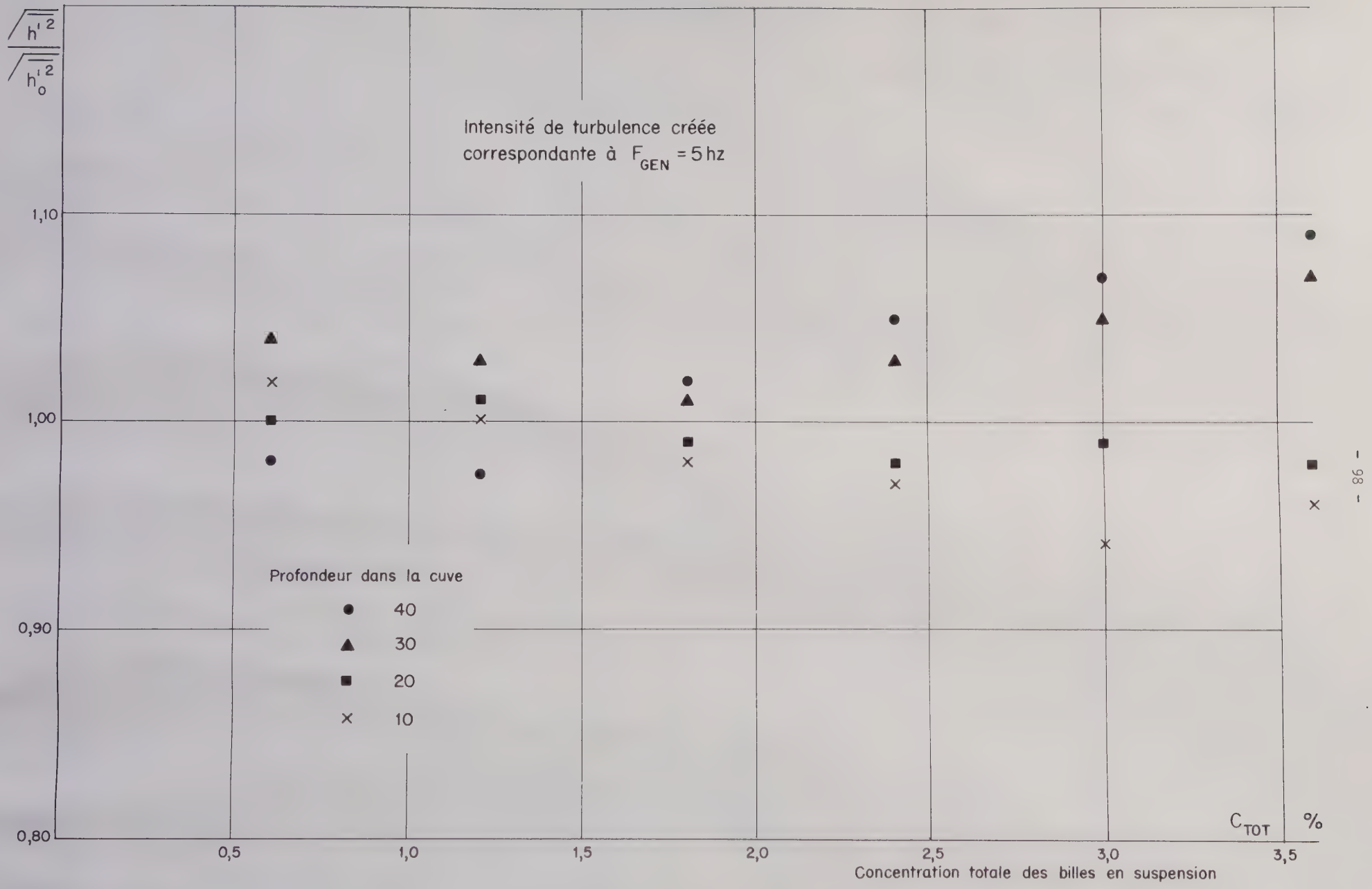



Fig. IV - 8 – Réduction des grandeurs mesurées au capteur de pression par rapport à l'eau pure en présence des particules solides en suspension.

La figure IV-5 montre que, dans le cas de création d'une forte turbulence dans la cuve, l'intensité turbulente même dans la partie supérieure de la cuve est peu modifiée. On peut constater que la turbulence au fond de la cuve (profondeur 30 et 40) augmente en présence des particules solides. Ce phénomène d'accroissement d'énergie turbulente au fond est lié au principe de génération de la turbulence dans la cuve. En effet, la production d'énergie turbulente est due au mouvement de la plaque perforée, qui crée les tourbillons de base. Evidemment, l'énergie qu'ils contiennent dépend de la vitesse de la plaque (déterminée par la fréquence et l'élongation de son mouvement). On peut écrire que cette énergie est égale à $E_0 = \rho_f u'^2$ ( $\rho_f$ : la densité de l'eau ; u' : la vitesse turbulente des tourbillons au fond). En présence des particules solides en suspension, si les paramètres du mouvement de la plaque sont les mêmes, le mécanisme de création des tourbillons de base étant le même, ceux-ci auront la même vitesse fluctuante (u'), mais contenant les particules solides plus lourdes que l'eau, leur énergie sera plus grande :

$$E_s = \left[ (1-C)\, \rho_f + C \rho_s \right] u'^2 \qquad \text{(IV-5)}$$

( $\rho_s$ : densité des particules solides ; c : concentration).

D'autre part, lorsque la plaque descend, les billes sont lancées à travers les trous avec une vitesse assez grande (de l'ordre de grandeur de 5 m/sec). Par conséquent, elles vont plus vite que l'eau au fond de la cuve et seront freinées par le liquide, en lui transmettant une part de leur énergie, dès qu'elles sont un peu éloignées de la plaque.

Enfin, l'augmentation de turbulence au fond est encore due au phénomène des heurts entre les billes et la plaque en mouvement, qui crée une turbulence supplémentaire au fond de la cuve (au point de vue d'énergie, cette turbulence supplémentaire correspond au transfert direct d'énergie cinétique de la plaque, qui entraîne les billes et ainsi indirectement au fluide).

## 5 - ESSAI D'INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX : ANALYSE DE MECANISME DE MODIFICATION DE TURBULENCE SOUS L'INFLUENCE DE PARTICULES SOLIDES EN SUSPENSION.

Nous avons constaté, dans notre étude, la modification de turbulence en présence de particules solides en suspension, par deux voies expérimentales différentes : par les mesures directes de turbulence, au fil chaud et au capteur de pression, et par les mesures de concentration de particules solides en suspension.

Nous allons, d'abord, procéder à une confrontation des résultats de ces

diverses mesures, afin de déterminer s'ils sont cohérents et s'ils cadrent bien dans la conclusion générale sur le changement de turbulence sous l'influence de particules solides en suspension.

Les mesures de turbulence en présence de particules solides en suspension, par la méthode du fil chaud avec le protecteur de sonde, ont été limitées, pour les raisons expliquées au chapitre III, à la partie supérieure de la cuve et au cas de la faible intensité de la turbulence, créée dans la cuve. Nous avons constaté, dans ce cas, une nette réduction de la vitesse turbulente sous l'influence des billes en suspension (figure III-5). D'autre part, pour ce même cas expérimental (la partie supérieure de la cuve - faible intensité de turbulence créée, $F_{GEN}$ = 2 et 3 hz), nous avons trouvé que la concentration relative ($I_N/N$) décroît considérablement en fonction de la quantité totale des billes en suspension dans la cuve (les figures III-18 et 19, profondeurs 10 et 20 cm). Dans notre analyse du phénomène de l'intéraction entre la suspension des particules solides et la turbulence de l'écoulement porteur, nous avons conclu que la variation de la concentration relative (la concentration absolue à un niveau donné, divisée par la quantité totale de particules solides en suspension) résulte de la modification (la réduction) de la turbulence. C'est-à-dire, nous sommes arrivés, par deux voies expérimentales différentes, à la même conclusion : la turbulence diminue sous l'influence de particules solides en suspension, si l'intensité de la turbulence créée dans la cuve est faible.

Dans le cas de forte intensité de turbulence, créée dans la cuve, nous avons pu constater, par les mesures effectuées au capteur de pression, que la modification de la turbulence est faible (la figure IV-5 - $F_{GEN}$ = 5 hz), mis à part l'accroissement de turbulence au fond de la cuve, dû aux phénomènes exposés. En effet, on peut remarquer sur la figure IV-5 que la réduction du mouvement turbulent, dans la partie supérieure de la cuve, est d'autant plus faible que l'intensité de la turbulence créée est plus forte. Suivant la tendance, exprimée par les courbes $\sqrt{\overline{h'^2}}(y)$ pour $F_{GEN}$ = 3, 4 et 4 hz, on pourrait admettre que, dans le cas $F_{GEN}$ = 6 hz pour lequel nous n'avons pas pu faire les mesures au capteur de pression (à cause des vibrations de la paroi), la turbulence est pratiquement inchangée en présence de particules solides en suspension. D'autre part, les mesures de concentration des billes en suspension ont montré que, dans le cas de forte turbulence créée dans la cuve ($F_{GEN}$ = 5 et 6 hz), les courbes (les droites) de concentration relative en fonction de la quantité totale des billes en suspension sont horizontales ( $\frac{I_N}{N}$ est constante) pour tous les niveaux de mesure dans la cuve (figure III-15 et 16). Conformément à notre explication de la signification physique des courbes $\frac{I_{N/N}}{I_{N=1}} = f(N)$ , donnée au chapitre III, cela résulte du fait que la concentration limite pour cette intensité de turbulence n'est pas encore atteinte, donc la turbulence n'est pas significative-

ment affectée par la présence de particules solides en suspension. Cette fois aussi, nous sommes arrivés, par deux voies expérimentales différentes, à la même conclusion : Si l'intensité de la turbulence, créée dans la cuve, est forte, il n'y a pas de modification de turbulence en présence des particules solides en suspension (pour la quantité donnée - maximum disponible - de billes) par rapport à l'eau pure.

Nous allons essayer d'interpréter les résultats et les conclusions de notre étude expérimentale et d'éclaircir le mécanisme de la modification de turbulence sous l'influence de particules solides en suspension, compte tenu du caractère particulier de la turbulence créée dans notre installation expérimentale.

Dans ce but, rappelons d'abord quelques conclusions de l'étude de BARENBLATT, exposée au chapitre I, et de notre analyse qualitative du mécanisme de l'interaction entre la suspension de particules solides et la turbulence de l'écoulement porteur (chapitre III). Nous avons vu que, suivant la conception de BARENBLATT, le critère de la modification de turbulence sous l'influence de particules solides dépend du rapport entre l'énergie fournie par l'écoulement pour mettre les particules solides en suspension et les autres termes du bilan d'énergie turbulente (en premier lieu, la production d'énergie turbulente et la dissipation visqueuse). Autrement dit, il s'agit, en effet, de la question suivante : la structure énergétique de la turbulence est-elle modifiée par l'effet de particules solides en suspension ? D'autre part, en considérant la question de la capacité de suspension d'un écoulement turbulent (chapitre III) nous sommes arrivés à la conclusion analogue, mais d'aspect dynamique : la modification de turbulence sous l'influence de particules solides en suspension dépend du rapport entre "la force de réaction" de particules solides sur la turbulence et les forces qui accompagnent le mouvement turbulent du fluide. On peut aussi formuler la question de la manière suivante : l'effet de particules solides modifie-t-il la structure dynamique de la turbulence ? Remarquons que notre conclusion est plus générale que celle de BARENBLATT, parce qu'il assimile l'effet global de particules solides sur la turbulence au "travail de la mise à suspension", qui ne représente, comme nous avons vu, qu'un aspect de l'influence de particules solides. Par contre, nous avons parlé de "la réaction de particules solides sur la turbulence", sans prétendre la définir précisément.

Nous pouvons essayer d'éclaircir la question traitée en considérant notre cas expérimental. Nous avons vu que le bilan d'énergie turbulente, dans la cuve à turbulence, pour l'eau pure, est constitué de l'apport d'énergie turbulente, provenant du fond de la cuve et de la dissipation visqueuse, qui sont en équilibre, puisque le mouvement est statistiquement permanent :

$$\frac{3}{2}\,\epsilon_0\,\frac{d^2E_0}{dy^2} = 15\,\nu_0\,\frac{E_0}{\lambda_0^2} \qquad \text{(IV-6)}$$

$$(E_0 = \overline{u_0^2})$$

Nous avons mis l'index "0" pour souligner qu'il s'agit des grandeurs correspondant au mouvement dans l'eau pure.

Dans le cas de la présence de particules solides en suspension, nous pourrions admettre le bilan énergétique sous la forme suivante :

$$\frac{3}{2}\,\epsilon_1\,\frac{d^2E_1}{dy^2} = 15\,\nu_1\,\frac{E_1}{\lambda_1^2} + \Delta \qquad \text{(IV-7)}$$

Nous admettons donc, en général, que toutes les grandeurs sont modifiées sous l'influence de particules solides en suspension. Introduisons dans le bilan énergétique le terme supplémentaire $\Delta$ qui doit exprimer l'effet de particules solides sur la turbulence. $\Delta$ est constitué, en général, de l'énergie de la mise en suspension des billes, et de la dissipation supplémentaire due au mouvement relatif des billes par rapport à l'eau. On peut admettre que $\Delta$ dépend premièrement de la concentration de particules solides, du rapport des densités des billes et du fluide, du rapport entre le diamètre des billes et de la taille des plus petits tourbillons :

$$\Delta = f\left(C, \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad \frac{d}{\eta} \quad \cdots\right)$$

Suivant la conception exposée, le rapport entre l'effet de particules solides sur la turbulence (exprimé par $\Delta$ ) et un des deux membres du bilan d'énergie turbulente dans l'eau pure (l'apport d'énergie par diffusion et la dissipation visqueuse) peut être considéré comme le critère de la modification de turbulence sous l'influence de particules solides. Considérons le rapport entre $\Delta$ et la dissipation visqueuse - ce rapport est plus commode pour l'évaluation numérique, à partir de résultats de notre étude expérimentale, qu'une autre grandeur qui ferait intervenir le terme de diffusion. Si l'on considère deux cas différents au point de vue de l'intensité de turbulence, créée dans la cuve - une forte et une faible turbulence - la différence de valeurs de la dissipation visqueuse en deux cas est considérable : pour une forte turbulence, $E$ est plus grande et $\lambda$ plus petite que pour une faible turbulence.

D'autre part, considérons l'effet des particules solides sur la turbulence, exprimé par $\Delta$ , dans notre cas expérimental. Etant donné que nous n'avons utilisé qu'une sorte de billes dans nos expériences, nous pouvons considérer que la variation de $\Delta$ dans notre cas, ne dépend que de la concentration. En fait, on pourrait admettre que l'effet de la concentration peut être exprimé par deux grandeurs : la concentration moyenne $\overline{C}$ et son gradient $d\overline{C}/dy$. Dans les deux cas - la forte et la

faible turbulence, créée dans la cuve - nous avons la même quantité totale de billes en suspension. Nous pouvons donc supposer que les valeurs de $\Delta$ en deux cas sont assez proches, bien que le gradient de la concentration moyenne soit différent. On peut conclure que le rapport entre l'effet de particules solides sur la turbulence et la dissipation visqueuse est beaucoup plus faible pour une forte turbulence que pour une faible turbulence. Autrement dit, l'effet d'une certaine quantité donnée des particules solides sur la turbulence est relativement d'autant plus faible que l'intensité de turbulence, créée dans la cuve, est plus forte.

Essayons d'évaluer numériquement le rapport entre l'effet de particules solides sur la turbulence et la dissipation visqueuse dans le cadre des résultats de notre étude expérimentale. Pour évaluer l'ordre de grandeur de $\Delta$ , prenons, faute de mieux, la formule de BARENBLATT :

$$\Delta = g W \sigma \overline{C} \qquad \text{(IV-8)}$$

$\Delta$ représente la dissipation supplémentaire de l'énergie turbulente, homogène à une énergie par unité de masse et dans l'unité de temps.

Dans notre cas, nous avons :

$W = 13,5$ cm/sec. (la vitesse de chute de billes)

$$\sigma = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0,10 \qquad (g = 981 \text{ cm/sec}^2)$$

$$\Delta = 1300 \ \overline{C} \qquad (\text{cm}^2/\text{sec}^3) \qquad \text{(IV-9)}$$

Prenons, par exemple, un niveau dans la partie inférieure de la cuve - la profondeur : 40 -

Nous avons :

a) $F_{GEN} = 2$ hz
$u' = 8,0$ cm/sec. $\quad \lambda = 3,0$ mm

b) $F_{GEN} = 6$ hz
$u' = 17,5$ cm/sec. $\quad \lambda = 1,5$ mm

Compte tenu de ce que, pour la température de l'eau dans la cuve (23°C)

$$\nu \approx 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}.$$

Nous pouvons calculer la dissipation visqueuse dans les deux cas :

$F_{GEN}$ = 2 hz ... $15\,\nu\,\frac{u'^2}{\lambda^2} = 0{,}15\,\frac{64}{0{,}09} = 108$ $(cm^2/sec^3)$

$F_{GEB}$ = 6 hz ... $15\,\nu\,\frac{u'^2}{\lambda^2} = 0{,}15\,\frac{306}{0{,}022} = 2040$ $(cm^2/sec^3)$

En ce qui concerne la concentration moyenne, nous avons évalué qu'à la quantité maximum disponible de billes dans la cuve ($C_{TOT}$ = 3,6 %) correspond, au fond de la cuve, la concentration moyenne entre 10 % et 15 %. Comme il ne s'agit que d'évaluation de grandeur de l'effet de particules solides sur la turbulence, nous pouvons admettre comme la valeur de $\overline{C}$ au niveau 40, pour tous les deux cas de l'intensité de turbulence, $\overline{C} \approx 10$ % (bien que $\overline{C}$ soit un peu plus grande à ce niveau pour $F_{GEN}$ = 2 hz que pour $F_{GEN}$ = 6 hz). Nous avons donc, suivant l'expression (IV-9) :

$$\Delta = 1.300\ \overline{C} = 130 \quad (CM^2/sec^3)$$

Si nous considérons maintenant le rapport entre les ordres de grandeur de l'effet de particules solides sur la turbulence ( $\Delta$ ) et la dissipation visqueuse $15\,\nu\,\frac{u'^2}{\lambda^2}$ , nous pouvons constater :

- Pour la faible intensité de la turbulence, créée dans la cuve ($F_{GEN}$ = 2 hz), $\Delta$ est de même ordre de grandeur que $15\,\nu\,\frac{u'^2}{\lambda^2}$ (130 $\leftrightarrow$ 108). La structure du bilan d'énergie turbulente est donc considérablement modifiée par rapport à celle de l'eau pure, ce qui signifie que la turbulence est significativement affectée par la présence de particules solides en suspension. A cause de la dissipation supplémentaire ( $\Delta$ ), de même ordre de grandeur que la dissipation visqueuse, l'énergie turbulente est considérablement réduite.

- Pour la forte intensité de la turbulence, créée dans la cuve ($F_{GEN}$ = 6 hz), $\Delta$ est négligeable par rapport $15\,\nu\,\frac{u'^2}{\lambda^2}$ (130 $\leftrightarrow$ 2040). La structure du bilan d'énergie turbulente n'est pas influencée par la présence de particules solides en suspension. L'énergie turbulente, étant donné que la dissipation supplémentaire est négligeable par rapport à la dissipation visqueuse, reste pratiquement la même que dans l'eau pure.

On peut constater que ces conclusions, qui résultent de la conception théorique exposée du mécanisme de l'influence de particules solides en suspension sur la turbulence, cadrent bien avec les résultats expérimentaux de notre étude.

# CONCLUSION

Nous avons effectué, au cours de notre étude expérimentale, plusieurs séries de mesures, différentes par leur nature, au point de vue de la grandeur mesurée et de la méthode appliquée. Nous avons présenté au chapitre III les mesures de turbulence en présence de particules solides en suspension par la méthode du fil chaud avec le protecteur de la sonde. Cette méthode a été utilisée aussi pour les mesures de la variation de la concentration de particules solides à un niveau donné, en fonction de la quantité totale des billes en suspension, mais dans un sens différent et d'une façon particulière, basée sur l'exploitation d'un phénomène parasite - le bouchage du protecteur par les billes - Enfin, nous avons présenté au chapitre IV les mesures de turbulence par la méthode du capteur de pression.

Nous avons constaté que les résultats de ces trois parties de notre étude expérimentale sont cohérents et qu'ils cadrent bien dans la conclusion sur la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension. Cette conclusion est la suivante :

- Le degré de la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides, pour une même quantité de billes en suspension, dépend de l'intensité de la turbulence, créée dans la cuve. Plus l'intensité de la turbulence est forte, moindre est la modification. Pour l'intensité maximum ($F_{GEN}$ = 6 hz), dans le cadre de notre étude expérimentale, la turbulence dans la cuve, en présence de billes en suspension, est pratiquement inchangée par rapport à l'eau pure. Par contre, si la turbulence créée dans la cuve est faible ($F_{GEN}$ = 2, 3 et 4 hz), sa modification sous l'influence de particules solides est notable.

Les aspects fondamentaux de la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides sont les suivants :

- Les vitesses turbulentes diminuent, par rapport à l'eau pure, à mesure que la concentration des particules solides en suspension augmente.

- Le spectre d'énergie turbulente est modifié : l'énergie correspondante aux basses fréquences (gros tourbillons) est diminuée, tandis que l'énergie correspondante aux fréquences plus élevées (notamment dans la zone d'inertie) est plus grande que dans le cas de l'eau pure. Il faut souligner que, d'après nos résultats expérimentaux, la courbe de densité spectrale est la plus modifiée par rapport à l'eau pure dans la gamme des basses fréquences. C'est-à-dire, ce sont les gros tourbillons qui sont les plus influencés par la présence de particules solides en suspension.

- La structure turbulente est modifiée par rapport à l'eau pure : la microéchelle et l'échelle intégrale sont réduites.

La question de la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension est liée directement à la question de la capacité de la turbulence de suspension de particules solides. Nous avons constaté que :

- Si l'intensité de la turbulence, créée dans la cuve, est forte, la capacité de suspension ne change pas en fonction de la quantité totale de billes en suspension. C'est-à-dire, la concentration de billes à un niveau donné augmente proportionnellement à la quantité totale de billes en suspension dans la cuve.

- Si, par contre, l'intensité de la turbulence, créée dans la cuve, est faible, la capacité de suspension dans la partie supérieure de la cuve diminue à la mesure que la quantité totale de billes en suspension augmente.

Nous espérons que ces quelques résultats expérimentaux contribueront à permettre une meilleure compréhension du phénomène de la modification de la turbulence sous l'influence de particules solides en suspension, compte tenu de ce qu'il s'agit d'un sujet relativement très peu exploré et mal connu. Cependant, une série d'essais ne constitue qu'un maillon dans la longue chaîne d'expériences qui permettent, peu à peu, d'élargir nos connaissances sur un problème étudié. Nous espérons que notre étude expérimentale, avec les méthodes de mesure de turbulence en présence de particules solides en suspension, que nous avons mises au point - du protecteur de la sonde à film chaud et du capteur de pression - ait ouvert la voie aux recherches ultérieures sur le même sujet. Dans ce cadre, on pourrait d'abord envisager plusieures séries de mesures, analogues à la nôtre, lesquelles doivent compléter nos résultats expérimentaux. En effet, nous n'avons effectué les essais qu'avec une seule sorte de billes.

On pourrait procéder aux mesures de turbulence avec les diverses sortes de billes en suspension, en variant leur diamètre et densité afin d'étudier l'influence des principaux paramètre qui agissent dans ce phénomène - le rapport entre la densité de particules solides et celle du fluide et le rapport entre le diamètre des billes et l'échelle des plus petits tourbillons -

## BIBLIOGRAPHIE

(1) E.A. ARNDT et A.T. IPPEN - "Turbulence measurements in liquids using an improved total pressure probe."
(Journal of Hydraulic Research, n°2, 1970).

(2) Y. AWAYA et T. KUSUDA - "The turbulence with fine particles in upward flow."
(Comptes rendus du XIIIe Congrès AIRH, Kyoto, Japon, 1969).

(3) G.J. BARENBLATT - "Sur le mouvement des particules en suspension dans un écoulement turbulent."
(Extrait du Priklad. Mat. i Mekh. T. XVII, 1953).

(4) G.K. BATCHELOR - "An introduction to fluid dynamics."
(Cambridge University Press, 1967).

(5) M. BOVARD - "Considérations théoriques sur le maintien en suspension des particules solides dans un courant turbulent uniforme."
(Mémoires et travaux de la Société Hydrotechnique de France, n° Spécial B, 1955).

(6) M. BOUVARD - "Effet d'inertie dans le transport en suspension. Essai de détermination de la saturation en suspension d'un écoulement."
(Congrès AIRH, Montréal, 1959).

(7) M. BOUVARD - "Turbulence sans vitesses moyennes et diffusion de particules solides dans l'eau."
(Thèse d'Etat, Grenoble, 1967).

(8) M. BOUVARD et H. DUMAS - "Application de la méthode du fil chaud à la mesure de la turbulence dans l'eau."
(La Houille Blanche, n°3 et n°7, 1967).

(9) S. BRUK et V. MILORADOV - "Transport capacity of turbulent two-phase flow."
(Comptes rendus du XIIIe Congrès AIRH, Kyoto, Japon, 1969).

(10) Y. BUYEVICH et Y. GUPALO - "Sur l'influence de particules solides en suspension dans un fluide sur la décroissance de la turbulence isotrope" (en russe)
(Zhurnal Prikl. Mat. i Tekh. Fiziki, 4, 1965).

(11) G. COMTE-BELLOT - "Les anémomètres à fil chaud et la mesure des fluctuations de vitesse et de température."
(Séminaire de Turbulence, Académie des Sciences de Pologne, Jablona, 1961).

(12) A. CRAYA - "Introduction à la théorie de la turbulence."
(Séminaire de Turbulence, Académie des Sciences de Pologne. Jablona, 1961).

(13) M.A. FIELD - "Entrainment into an air jet laden with particules."
(Memb. Inf. Circ. British Coal Utilisation Research Association 272, 1963).

(14) A. FORTIER - "Mécanique des suspensions"
(Masson, Paris, 1967).

(15) S.K. FRIEDLANDER et L. TOPPER - "Turbulence classic papers on statistical theory."
(Interscience Publishers, New York, 1961).

(16) M. HINO - "Turbulent flow with syspended particles."
(Proceedings ASCE, July, 1963).

(17) J.O. HINZE - "Turbulence."
(Mc Graw Hill Book Compagny, 1959).

(18) J.O. HINZE - "Momentum et mechanical energy balance equations for a flowing homogeneous suspension with slip between the two phases."
(Appl. Sci. Res., Section A, Vol. 11, 1962).

(19) A.T. IPPEN et F. RAICHLEN - "Turbulence in civil engineering : Measurements in free surface streams."
(Proceedings ASCE, october, 1957).

(20) D.A. KENNEDY - "Some measurements of the dispersion of spheres in a turbulent flow."
(Ph. D. Thesis - Johs Hopkins University, 1965).

(21) J.L. LUMLEY - "Some problems connected with the motion of small particles in turbulent fluid."
(Ph. D. Thesis - John Hopkins University, 1957).

(22) M.V. PECHENKIN et B.E. VEDENEEV - "Experimental studies of flows with high solid particle concentrations."
(Comptes Rendus du XIIIe Congrès AIRH, Kyoto, Japon, 1969).

(23) N.A. SILIN, Y.K. VITOSHKIN, V.M. KARASIK et V.F. OCHERETKO - "Research of the solid-liquid flows with high consistence."
(Comptes Rendus du XIIIe Congrès AIRH, Kyoto, Japon, 1969).

(24) W.H. SNYDER et J.L. LUMLEY - "Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow."
(Journal of Fluid Mechanics, vol. 48, 1971).

(25) S.L. SOO - "Statistical properties of momentum transfert in two-phases flow."
(Chemical Engineering Science, April, 1956).

(26) S.L. SOO - "Fluid dynamics of multiphase systems."
(Blaisdell Publishing Company, London, 1967).

(27) C.M. TCHEN - "Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid."
(Martinus Nijhoff, The Hague, 1947).

(28) L.B. TOROBIN et W.H. GAUVIN - "Fundamental aspects of solid-gas flow."
(The Canadian Journal of Chemical Engineering, Août 1959).

(29) J.J. VAN DEEMTER et E.T. VAN DER LAAN - "Momentum and energy balances for dispersed two-phases flow."
(Appl. Sci. Res., Section A, Vol. 10, 1961).

(30) V.A. VANONI - "Transportation of suspended sediment by water."
(Transactions ASCE - 111, 1946).

(31) V.A. VANONI et G.N. NOMICOS - "Resistance properties of sediment-laden streams."
(Transactions ASCE, Vol. 125, 1960).

(32) O.F. VASILIEV - "Problems of two-phase flow theory."
(General Lecture, XIIIe Congrès AIRH, Kyoto, Japon, 1969).

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 21 mars 1972

le Président de la thèse

VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

G. GAU